

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 化學科

030207

紅黑大對抗- 探討硫酸銅電鍍的影響因素

學校名稱：嘉義市立民生國民中學

作者： 國二 雷冠彥 國二 李依璇 國二 黃羿瑄	指導老師： 吳銘訓 陳正雍
---	-----------------------------

關鍵詞：電鍍、硫酸銅

摘要

利用硫酸銅進行電鍍實驗，我們發現了與預期不符合的結果，所以進行了這個研究，在這個研究中，我們探討了電流大小、正負極距離、電鍍液濃度、被鍍物角度、是否攪拌、是否外加磁場以及電鍍物的溫度對電鍍完成度以及均勻度的影響，並探討了電鍍時產生黑色物質。我們發現電鍍產生的黑色物質應該是結構鬆散的金屬銅，而要避免產生黑色電鍍表面並電鍍均勻，必須提高硫酸銅濃度，避免太大的電流，並攪拌溶液。

壹、研究動機

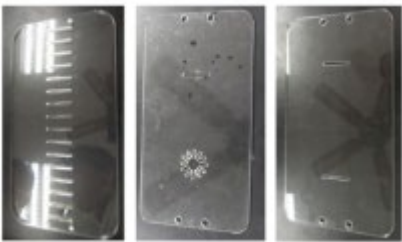



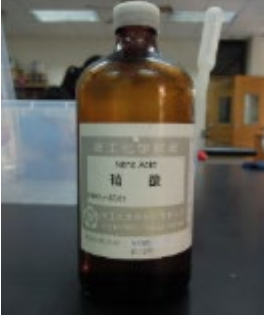











在一次週六的實驗課，授課的內容是國中的標準實驗——電解電鍍。我們分組進行實驗，利用硫酸銅溶液，被鍍物以及銅片進行實驗。我們預期的實驗結果是均勻紅銅覆蓋在被鍍物上，但分組實驗後發現，有些組別被鍍物被鍍上銅但不均勻，有些組別被鍍物則被覆蓋上黑色物質，也有些組別的被鍍物兩面鍍上的銅不均勻，一面薄，一面厚。不知為何在相同條件下，卻有不同的實驗結果，於是我們決定著手進行研究。

在查詢資料的過程中我們發現在第 44 屆全國科展作品——金屬的盔甲中提到他們電鍍硫酸銅時也會產生黑色的物質，並認為是金屬銅快速結晶，原子排列不規則所造成，而第 57 屆的全國科展作品——變形金「筆」中，電鍍銅也產生了黑色物質，並認為是氧化銅，所以在我們研究的最後也放在探討產生黑色物質為何？

貳、研究目的

- 一、探討不同電流大小對電鍍結果的影響
- 二、探討電極距離對電鍍結果的影響
- 三、探討不同濃度的硫酸銅水溶液對電鍍結果的影響
- 四、探討被鍍物方向對電鍍結果的影響
- 五、探討加入磁場對電鍍結果的影響
- 六、探討溶液擾動對電鍍結果的影響
- 七、探討電解液溫度對電鍍結果的影響
- 八、探討電鍍時發生的黑色物質

參、研究設備及器材

 <p style="text-align: center;">蓋板</p>	 <p style="text-align: center;">電磁加熱攪拌器與攪拌子</p>	 <p style="text-align: center;">瓦斯爐、溫度計</p>	
 <p style="text-align: center;">鹽酸</p>	 <p style="text-align: center;">硝酸</p>	 <p style="text-align: center;">刮勺與硫酸銅</p>	 <p style="text-align: center;">手機顯微鏡</p>
 <p style="text-align: center;">電子秤</p>	 <p style="text-align: center;">被鍍物(抹刀)</p>	 <p style="text-align: center;">塑膠盒(電鍍槽)</p>	
 <p style="text-align: center;">酒精燈</p>	 <p style="text-align: center;">電源供應器</p>	 <p style="text-align: center;">三用電表</p>	
 <p style="text-align: center;">磁鐵</p>	 <p style="text-align: center;">銅片</p>	 <p style="text-align: center;">吹風機</p>	

肆、研究過程、結果與討論

一、準備實驗：組裝實驗器材並配置實驗使用的溶液

我們決定要先探討如何讓電鍍硫酸銅又快又好，討論後，以蒸餾水及有水硫酸銅 ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 配置溶液。蓋板的部分，利用雷射切割機裁切出所需的模板，並將其鎖在溶液槽上。接著我們將兩個三用電表嵌入紙箱當中，以方便記錄。最後由電源供應器接出電線至三用電表，再由三用電表接出電線，並以銅線連接鱷魚夾，再將被鍍物(抹刀)與銅片取適當距離插入溶液槽中，分別夾上正極和負極的鱷魚夾，形成通路，即形成實驗裝置。

1. 利用雷射切割機，設計出實驗所需的蓋板，包括可調整距離的蓋板(如圖 1.a)、可調整角度的蓋板(如圖 1.b)、以及可放下環形強力磁鐵的蓋板(如圖 1.c)，並以 3mm 後的壓克力板切出實驗所需要的蓋板，分別如圖 1 所示。



圖 1.a 可調整距離的蓋板、圖 1.b 可調整角度的蓋板、圖 1.c 磁場用蓋板

2. 以蒸餾水和硫酸銅配置所需濃度的硫酸銅水溶液，過濾後，將溶液倒入電鍍槽內，鎖上上蓋，並將待鍍物與銅片插入電鍍槽中，如下圖所示。

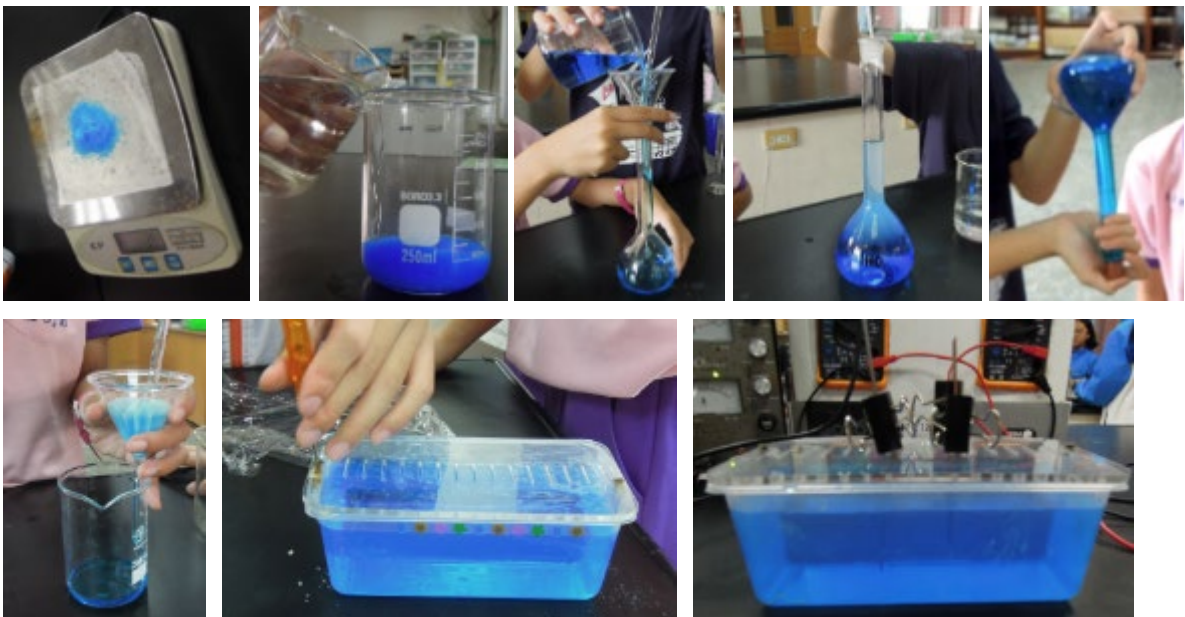


圖 2：配置硫酸銅電鍍液

3. 組裝電鍍的裝置，電路圖如下，為了方便觀察與減少每次實驗重新組裝電路，我們將紙箱挖出適當大小，嵌入伏特計與安培計，並固定電路裝置。

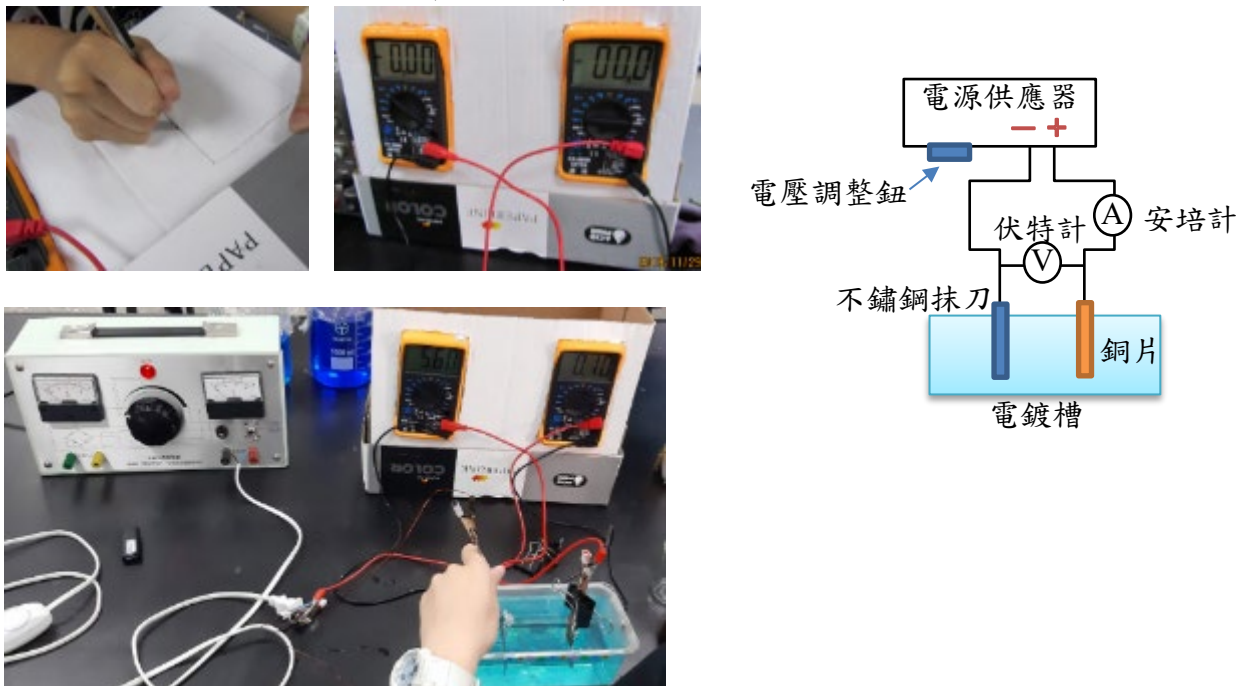


圖 3：電路設計圖及完成電鍍裝置

4. 我們將電鍍結果拍照，以固定的電流與硫酸銅濃度進行電鍍，每隔一段時間取出，以蒸餾水沖洗後烘乾，作出標準試片拍照，並選擇固定的點，用 PhotoImpact 軟體色彩選擇工具，取出該點的 R/G/B 值，作為後續實驗比對之用。

表一：電鍍完成度與電鍍時間的實驗數據

試片										
電鍍時間	0 秒	15 秒	30 秒	45 秒	60 秒	75 秒	90 秒	105 秒	120 秒	純銅片
R	124	147	177	188	189	203	202	216	234	223
G	114	130	152	155	148	161	155	176	188	154
B	105	115	138	140	137	136	137	141	167	128
R-G	10	17	25	33	41	42	47	40	46	69
R-B	19	32	39	48	52	67	65	75	67	95
加總(R-G 與 R-B)	29	49	64	81	93	109	112	115	113	164
電鍍完成度	0%	15%	26%	39%	47%	59%	61%	64%	62%	100%

因為純銅片顏色偏紅，所以我們用 R-G 值與 R-B 值的加總值當作參考，以未電鍍的抹刀作為電鍍完成度 0% 的點，以純銅片的表面顏色作為電鍍完成度 100% 的點，以鍍銅表面顏色的變化量來定義為電鍍完成度。

將上表整理如下圖，可看出在這個電鍍條件下，大約在 80~90 秒電鍍完成度就達到穩定，也就是鍍銅表面的顏色幾乎不再變化。以眼睛觀察電鍍表面，發現在電鍍時間短時，底材的不銹鋼灰色會透出來，所以看起來橘色中夾雜這灰色，電鍍時間長時，電鍍表面呈現銅的橘紅色。

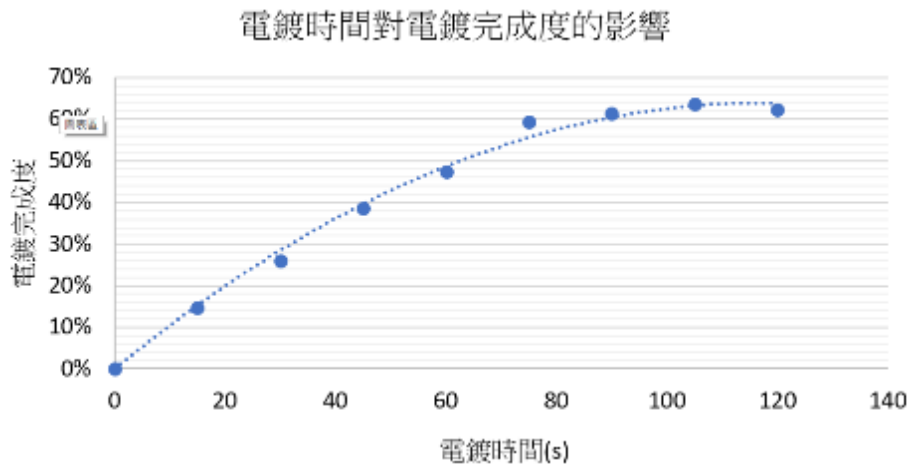


圖 4：電鍍時間對電鍍完成度的關係圖

我們以手機顯微鏡拍攝電鍍表面，發現在 15 秒及 30 秒的銅鍍膜上，可觀察到有較多灰色的凹凸，電鍍時間越長時，灰色越不明顯，橘紅色越明顯，所以我們使用電鍍完成度表示金屬銅在抹刀上的覆蓋比率及底材的透光程度，電鍍完成度較高也表示鍍得比較厚，使抹刀的顏色被覆蓋較完整。

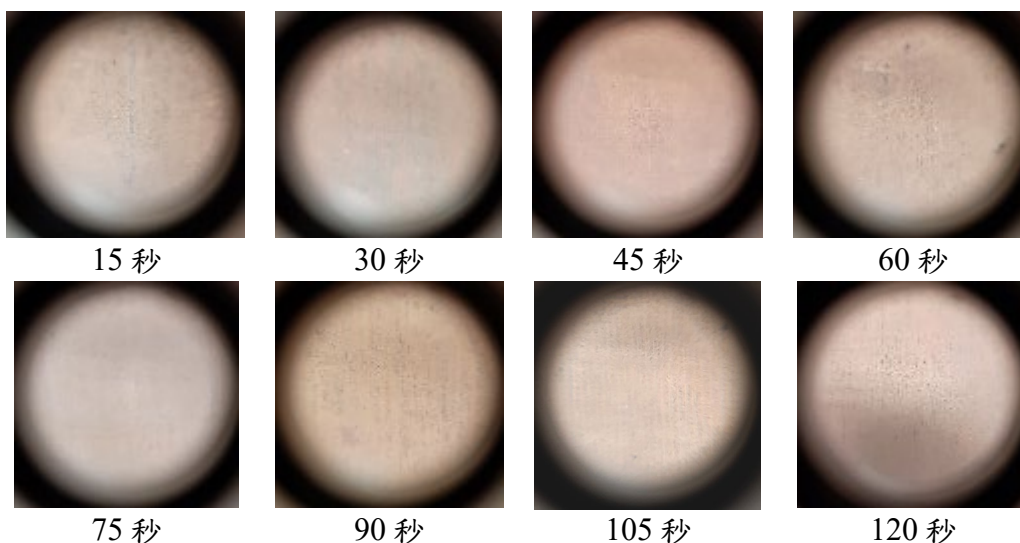


圖 5：不同電鍍時間的電鍍表面放大圖

為了瞭解相同條件但不同電鍍時間度出來的銅膜結晶狀態好不好，所以我們另外進行了30秒、60秒、90秒、120秒、150秒、180的鍍銅，再將抹刀裁剪成1平方公分大小的樣品，進行X-射線繞射分析(XRD)，結果如下圖。

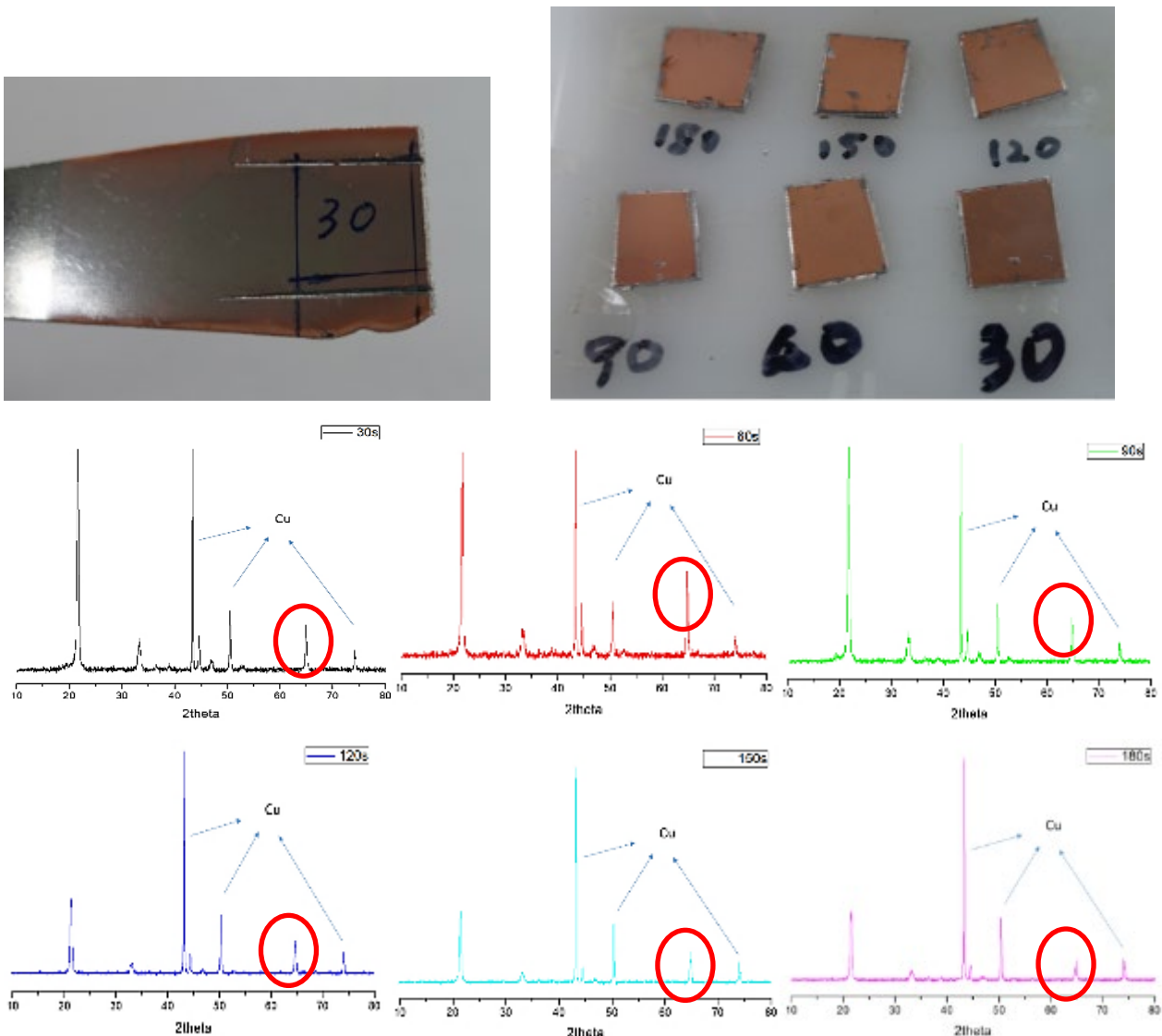


圖 6、不同電鍍時間的電鍍樣本與的 XRD 結果

由以上結果可以發現，當電鍍時間較短時，測量到其他雜質的相對訊號較強，當電鍍時間較長時，其他雜質的相對訊號較弱，也代表較好的銅覆蓋率及較厚的銅。

而且二年級我們學到化學反應速率單元時，以硫代硫酸鈉及鹽酸進行不同條件下的反應素率測量時，是以反應產生的硫蓋住燒杯底部的十字來判斷反應完成，而在這裡我們也是利用電鍍產生的金屬銅蓋住底部的不銹鋼底材顏色來判斷反應完成的程度。

因此我們接下來的實驗就利用該電鍍表面的 R/G/B 值進行分析比較不同條件下的電鍍完成度。

二、實驗一：探討不同電流對電鍍結果的影響

在我們利用 10 元硬幣試作實驗的時候發現，經常在電鍍過程中，硬幣的邊緣電鍍表面變黑了，如右圖六所示，猜測可能是因為電流太大造成的結果，所以我們決定先探討不同電流大小對電鍍結果的影響。

我們固定銅片與被鍍物(抹刀)的距離為 7 公分，硫酸銅濃度為 0.5M，電量為 18 庫侖，調整電壓旋鈕，使電流為 0.2 安培(A)，進行電鍍，時間為 90 秒，電鍍完成後以洗滌瓶中的蒸餾水沖洗抹刀表面，並拍照，然後將電流

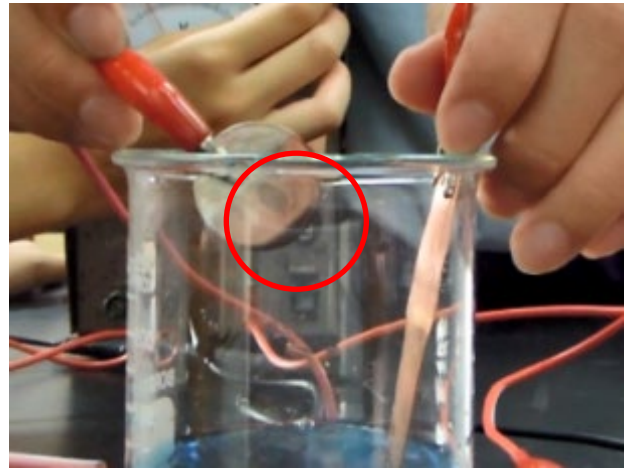


圖 7: 硬幣電鍍後變黑

調整成 0.3A 且電鍍時間為 60 秒、0.4A 且電鍍時間為 45 秒、以此類推如下表，直到觀察到電鍍表面變黑為止。

表二、固定電量時的電流與時間

電流(安培、A)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
時間(秒、s)	90	60	45	36	30	26	23	20
電量(庫侖、C)	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.2	18.4	18.0

結果

我們發現，當電流加大到 0.8A 時，電鍍沒有幾秒鐘，抹刀的電鍍邊緣就開始變黑了，當電流到 0.9A 時，電鍍邊緣變黑就很明顯，如下表中圖片我們將結果整理如下：

表三：不同電鍍的電流下，電鍍的正面圖片

電流	正面	電流	正面
0.2A		0.3A	
0.4A		0.5A	
0.6A		0.7A	
0.8A		0.9A	

接下來我們利用 PhotoImpact 軟體色彩選擇工具，取出上述照片固定點的 R/G/B 值，整理如下表並作圖如下圖七：

表四：不同電鍍的電流下，電鍍的正反面照片的 R/G/B 值與電鍍完成度

	電流(A)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
正面	R	117	113	109	115	121	115	100	變黑
	G	92	88	87	91	97	89	64	
	B	89	82	76	84	85	86	52	
	R-G	25	25	22	24	24	26	36	
	R-B	28	31	33	31	36	29	48	
	加總(R-G與R-B)	53	56	55	55	60	55	84	
	電鍍完成度	29%	31%	30%	30%	33%	30%	49%	

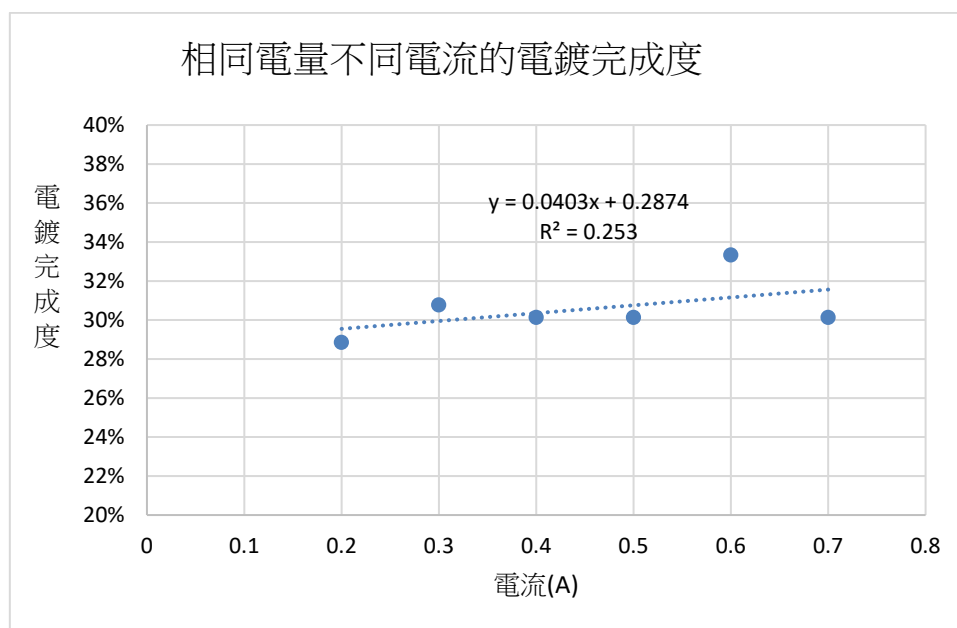


圖 8.電流大小對正面電鍍完成度的影響

討論：

由以上結果知道，在固定電量不變的情況下，電流大小對電鍍完成度影響不大。仔細觀察實驗過程，可以發現，在我們的實驗條件下，當電流為 0.8A 時，在抹刀邊緣的電鍍表面容易出現變黑，如下圖八，當電流大到 0.9A 時，很快就會變黑，如果持續電鍍的話，黑色部分會向中心擴大，並且慢慢有部分黑色的物質會掉落到溶液底部，但是當電流小於 0.7A 時，不管是抹刀邊緣還是中心，電鍍表面都不會變黑。

我們推測有兩種可能的原因：一是因為電流大時，銅離子在負極接收電子變成金屬銅附著在抹刀表面時，附著的不均勻造成電鍍層結構鬆散，凹凸不平，而凹凸不平的表面容易吸收光線使電鍍表面呈現黑色。第二個可能的原因是因為要產生較大的電流，所以調高電壓，使得電鍍時產生了氧化銅，氧化銅是黑色的，造成電鍍的表面變黑。

另外我們觀察到黑色的部分主要發生在抹刀的邊緣，如右圖。懷疑是因為抹刀邊緣曲率半徑較小，而導體表面電荷密度與半徑成反比，所以邊緣的負電荷密度高，電鍍速度太快，導致這個部位容易變黑。



圖 9：電流大時邊緣變黑

三、實驗二：探討電極距離對電鍍結果的影響

接下來我們想要了解負極的被鍍物(抹刀)與正極的銅片之間的距離是否影響電鍍的結果，所以我們固定硫酸銅的濃度為 0.5M、電流為 0.6A、電鍍時間 30 秒，電極距離 3cm 進行電鍍，一開始先用測試抹刀進行電流調整，調整電壓鈕確定電流為 0.6A，再換上新抹刀進行電鍍，電鍍完成後以洗滌瓶中的蒸餾水沖洗抹刀表面，並拍照紀錄。然後分別改變電極距離為 5cm、7cm、9cm、11cm，重複上步驟先調整好電流為 0.6A，再進行電鍍。

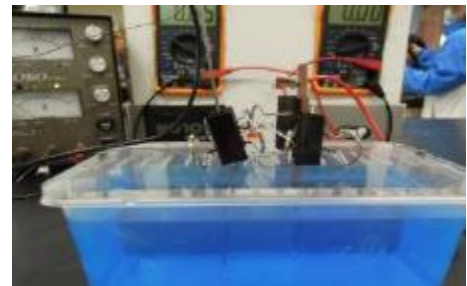


圖 10.不同電極距離的電鍍裝置與電壓

結果：

我們一樣將電鍍後的照片讀出該電鍍表面的 R/G/B 值進行記錄與分析，在實驗過程中，我們也記錄不同電極距離時需要維持 0.6A 的電壓，觀察電壓的變化，紀錄如下表四。



圖 11：不同電極距離的電鍍結果

表五：不同電極距離下，電鍍的正面的 R/G/B 值與電鍍完成度

距離(cm)	3	5	7	9	11
R	132	126	136	133	127
G	106	102	115	113	109
B	89	86	103	100	99
R-G	26	24	21	20	18
R-B	43	40	33	33	28
加總(R-G 與 R-B)	69	64	54	53	46
電鍍完成度	39%	36%	29%	29%	24%
0.6A 時的電壓(V)	3.49	4.62	5.07	6.6	8.01

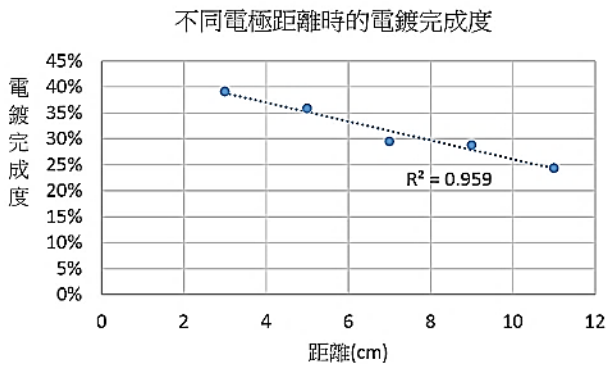


圖 12.a 電極距離對電鍍完成度的影響

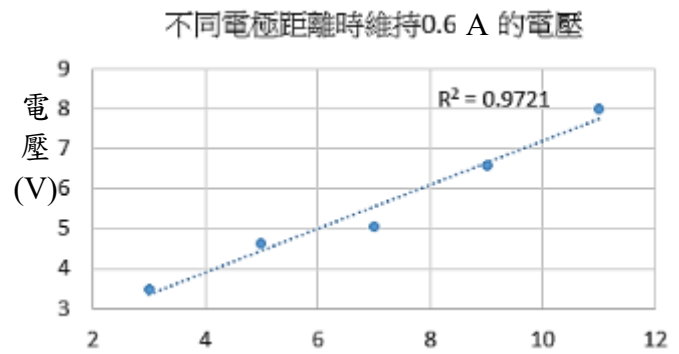


圖 12.b 維持 0.6A 電極距離對所需的電壓

討論：

雖然我們固定電流大小不變與電鍍時間不變，電鍍的總電量應該不變，但是由實驗結果可以發現電鍍的完成度還是會隨著距離的增加而降低，電極距離 3 公分時電鍍完成度約 39%，但距離 11 公分時的電鍍完成度大約只有 24%，大約下降了 40%。而我們也觀察到電極距離越遠，維持 0.6A 所需要的電壓越大。

四、實驗三：討不同濃度的硫酸銅水溶液對電鍍結果的影響

接下來我們想要了解不同濃度的硫酸銅溶液對於電鍍結果有甚麼影響。我們用燒杯秤取 250.0 公克的五水硫酸銅($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)，先加少量蒸餾水攪拌，等到硫酸銅完全溶解，再將硫酸銅溶液倒入 1 公升的容量瓶中，然後加蒸餾水到 1 公升的刻度，配出濃度 1.0M 的硫酸銅溶液。

然後秤取 125.0 公克的五水硫酸銅，以相同的方法配出 0.5M 濃度的硫酸銅溶液。接下來量取 100mL 的 1.0M 硫酸銅溶液加到 1 公升的容量瓶中，再加入蒸餾水到 1 公升的刻度，配出濃度 0.1M 的硫酸銅溶液。

最後量取 100mL 的 0.5M 硫酸銅溶液加到 1 公升的容量瓶中，再加入蒸餾水到 1 公升的刻度，配出濃度 0.05M 的硫酸銅溶液。

我們將 1.0M 硫酸銅溶液倒入電鍍槽中，鎖好上蓋，插入正極的銅片與測試電流用的抹刀，打開電源供應器的開關，利用電壓鈕調整電流為 0.1A，然後關到電源，再換上新抹刀，正式電鍍 180 秒，電鍍完成後以洗滌瓶中的蒸餾水沖洗抹刀表面，並拍照紀錄。然後倒出電鍍液，改用 0.5M 硫酸銅溶液重複上述步驟進行實驗，並分別再用 0.1M 與 0.05M 硫酸銅溶液進行實驗。

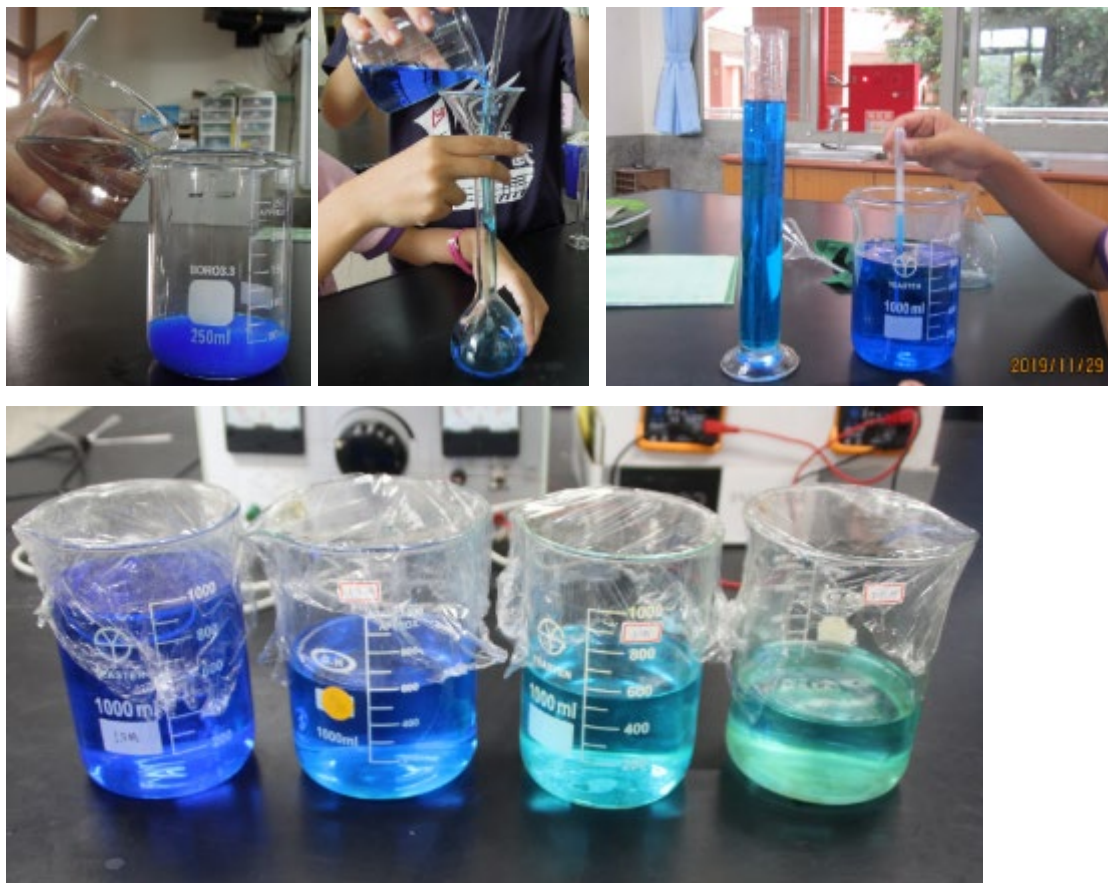


圖 13.配置不同濃度的硫酸銅電鍍液

結果：

我們原本以 0.6A 電流進行電鍍，但是發現當硫酸銅溶液為 0.05M 時，0.6A 會很快使得電鍍表面變黑，所以我們嘗試降低電鍍的電流，發現在 0.1A 時，電鍍表面不會一下子就變黑，所以改用 0.1A 來進行實驗，時間都是 180 秒。

我們一樣將電鍍後的照片讀出該電鍍表面的 R/G/B 值進行記錄與分析，紀錄如下表。



圖 14.不同濃度的硫酸銅電鍍液的電鍍結果

表六：不同電鍍液濃度下，電鍍的正反面的 R/G/B 值與電鍍完成度

		濃度(M)	0 秒	1	0.5	0.1	0.05
正面	R		136	136	136	157	變黑
	G		133	114	118	128	
	B		131	112	98	114	
	R-G		3	22	18	29	
	R-B		5	24	38	43	
	加總(R-G與R-B)		8	46	56	72	
	電鍍完成度		0%	24%	31%	41%	
反面	R		136	138	117	129	
	G		133	124	104	107	
	B		131	119	92	95	
	R-G		3	14	13	22	
	R-B		5	19	25	34	
	加總(R-G與R-B)		8	33	38	56	
	電鍍完成度		0%	16%	19%	31%	

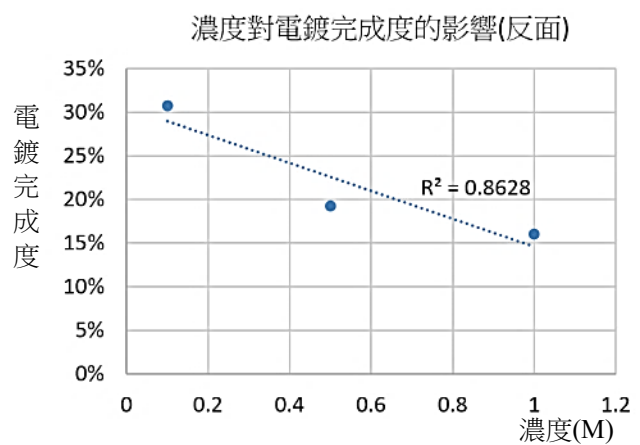
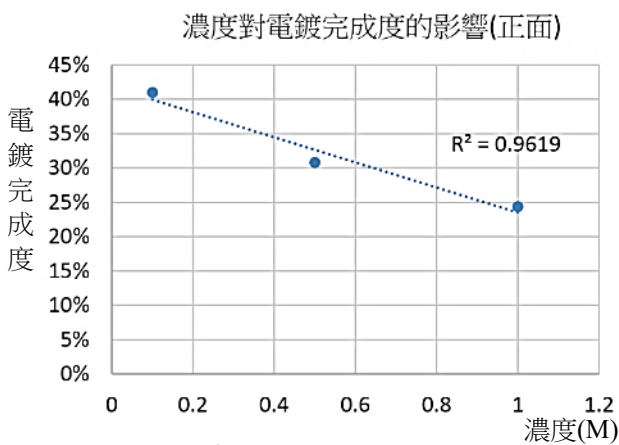


圖 15.硫酸銅濃度對電鍍完成的影響

討論：

由以上的結果我們可以知道，濃度低時，容易出現電鍍表面變黑，在濃度 0.5M 時，電流可以到 0.7A 還不會使電鍍表面變黑，但是當濃度是 0.05M 時，只要電流達到 0.1A，電鍍表面就會變黑了。

另外雖然我們都固定電流大小為 0.1A，時間為 180 秒，電量相同，但是我們發現濃度越低，電鍍的完成度越高，也就是說相同的電流時，反而濃度低的電鍍液較有利於電鍍。

但是濃度低時無法調高電流，因為會使高電流會使電鍍表面變黑，而濃度高時，可以容許以較大的電流來進行電鍍不會變黑，所以如果是固定電量，還是應該以較高的濃度來進行電鍍，以節省電鍍的時間。

而且我們可以由下圖 15 觀察到在這樣的實驗條件下，高濃度的 1.0M 正面與背面電鍍完成度有明顯的差異，眼睛就可以觀察的出來，而低濃度 0.1M 的電鍍，正背面的差異不明顯。

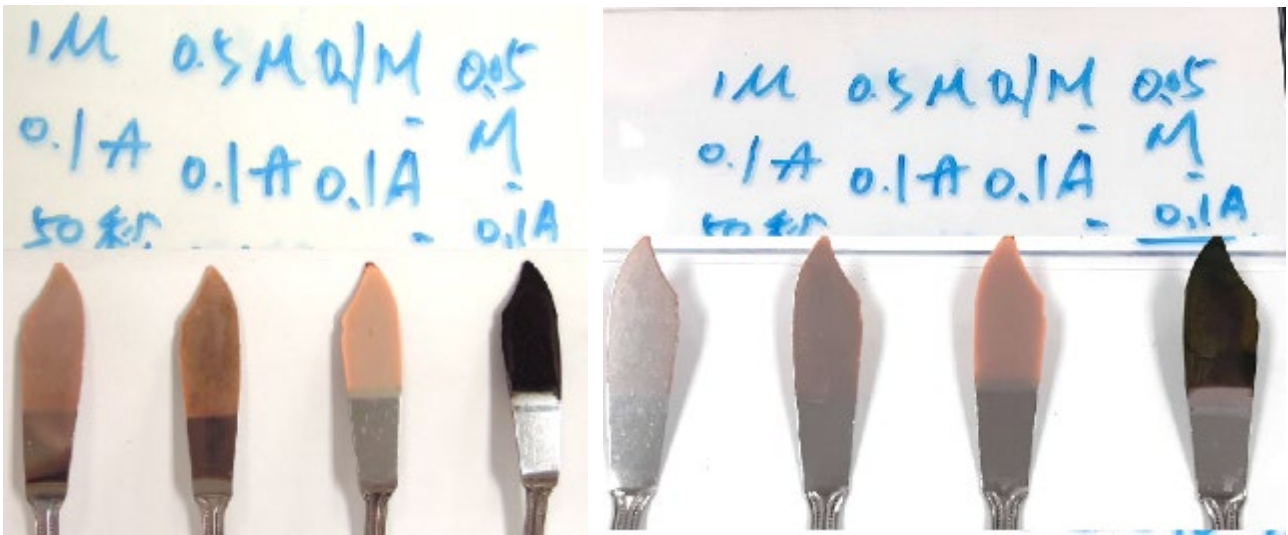


圖 16. 不同電鍍液濃度正面(左)與反面(右)放大圖

五、實驗四：探討被鍍物方向對電鍍結果的影響

接下來我們想要了解不同的電鍍方向對於電鍍結果有甚麼影響。我們設計了電鍍蓋板，使兩電極的距離為 7cm，可以將被鍍物(抹刀)旋轉一個角度，我們定義抹刀與銅片平行時為 0 度，分別逆時針旋轉 30 度、60 度、90 度進行實驗，如下圖 16，觀察實驗結果有沒有因為角度不同而有差別。

我們固定電流大小為 0.6A，硫酸銅濃度為 0.5M、電鍍時間為 30 秒，來進行不同角度的實驗。

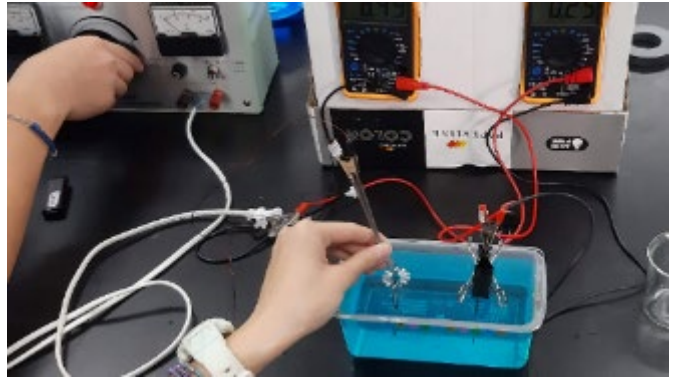
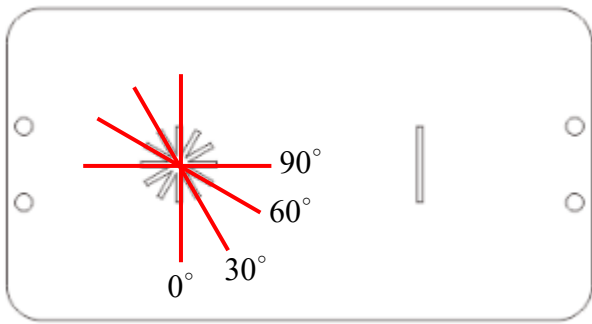


圖 17.待鍍物(抹刀)的放置與旋轉方向與實際裝置圖

在旋轉角度時，我們將抹刀的短邊向下，依序逆時針旋轉 30 度、60 度與 90 度，也就是說在 30 度、60 度與 90 度的實驗中，抹刀的短邊較靠近銅片。

結果：

我們想要探討不同角度時電鍍的均勻程度，所以我們正反面各取以下五個點進行 R/G/B 數值的讀取與電鍍完成度的計算，取樣點的位置如下圖所示，分別統計各種角度的正反面結果如下表七-表十：

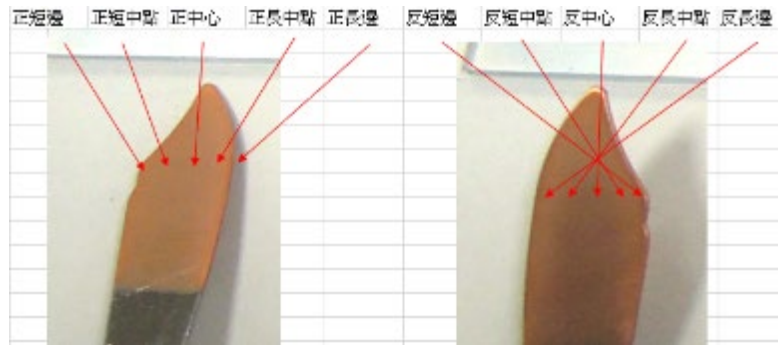


圖 18.電鍍完成的取樣點

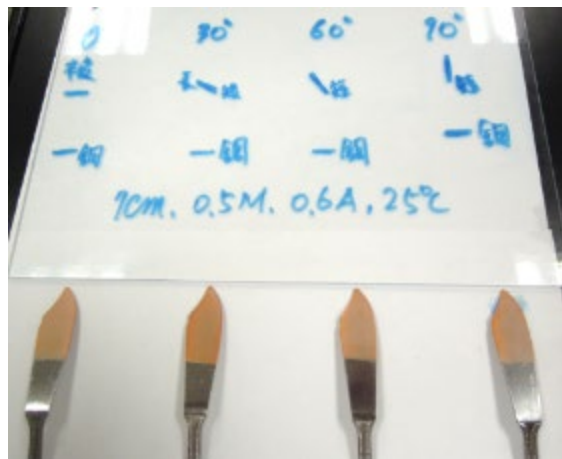
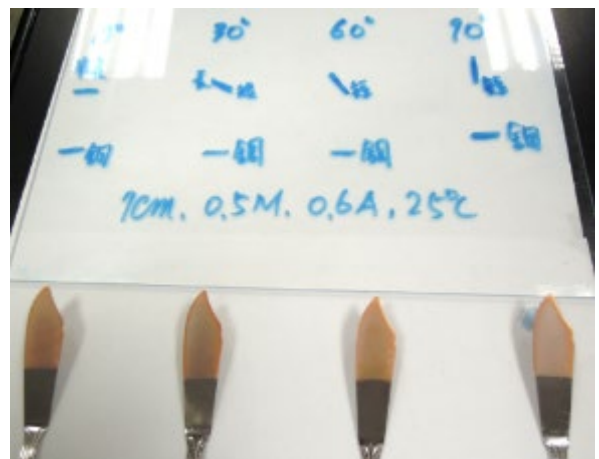


圖 19.不同電鍍方向的電鍍結果, 正面(左)



反面(右)

表七. 旋轉 0 度時電鍍表面各點的電鍍完成度

0 度	正短邊	正短中點	正中心	正長中點	正長邊	反短邊	反短中點	反中心	反長中點	反長邊
R	148	137	136	143	151	137	127	117	132	137
G	122	116	118	123	126	109	104	104	113	115
B	98	96	98	111	102	96	89	92	98	94
R-G	26	21	18	20	25	28	23	13	19	22
R-B	50	41	38	32	49	41	38	25	34	43
加總(R-G與R-B)	76	62	56	52	74	69	61	38	53	65
電鍍完成度	44%	35%	31%	28%	42%	39%	34%	19%	29%	37%

表八. 旋轉 30 度時電鍍表面各點的電鍍完成度

30 度	正短邊	正短中點	正中心	正長中點	正長邊	反短邊	反短中點	反中心	反長中點	反長邊
R	148	138	124	117	143	141	139	133	134	149
G	114	115	105	94	119	103	124	119	124	131
B	97	102	92	96	109	104	115	110	102	115
R-G	34	23	19	23	24	38	15	14	10	18
R-B	51	36	32	21	34	37	24	23	32	34
加總(R-G與R-B)	85	59	51	44	58	75	39	37	42	52
電鍍完成度	49%	33%	28%	23%	32%	43%	20%	19%	22%	28%

表九. 旋轉 60 度時電鍍表面各點的電鍍完成度

60 度	正短邊	正短中點	正中心	正長中點	正長邊	反短邊	反短中點	反中心	反長中點	反長邊
R	157	148	138	136	145	149	126	116	126	130
G	125	120	120	120	121	113	103	102	103	108
B	95	112	115	116	112	96	94	97	105	103
R-G	32	28	18	16	24	36	23	14	23	22
R-B	62	36	23	20	33	53	32	19	21	27
加總(R-G與R-B)	94	64	41	36	57	89	55	33	44	49
電鍍完成度	55%	36%	21%	18%	31%	52%	30%	16%	23%	26%

表十. 旋轉 90 度時電鍍表面各點的電鍍完成度

90 度	正短邊	正短中點	正中心	正長中點	正長邊	反短邊	反短中點	反中心	反長中點	反長邊
R	146	137	135	139	143	158	160	154	157	154
G	103	110	117	115	113	119	139	137	135	133
B	91	107	115	125	119	102	126	129	141	123
R-G	43	27	18	24	30	39	21	17	22	21
R-B	55	30	20	14	24	56	34	25	16	31
加總(R-G與R-B)	98	57	38	38	54	95	55	42	38	52
電鍍完成度	58%	31%	19%	19%	29%	56%	30%	22%	19%	28%



圖 20.a: 0 度時正反面各點的電鍍完成度



圖 20.b: 30 度時正面各點的電鍍完成度



圖 20.c: 60 度時正反面各點的電鍍完成度

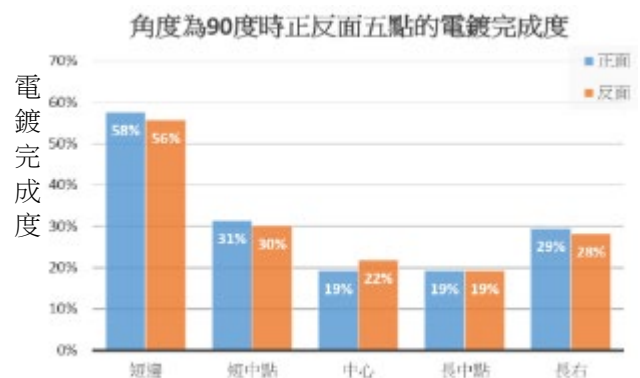


圖 20.d: 90 度時正面各點的電鍍完成度

討論：

由以上結果我們可以發現，不管哪一種角度，電鍍表面邊緣處的電鍍完成度大於中心處，我們實際觀察電鍍後銅片也是相同的結果。這也驗證了我們之前的懷疑，因為抹刀邊緣曲率半徑較小，而導體表面電荷密度與半徑成反比，所以邊緣的負電荷密度高，所以電鍍的完成度較高，鍍上去的銅厚度較厚。

當被鍍物(抹刀)旋轉角度越大時，靠近銅片的一端電鍍完成度會大於遠離銅片的那一端，再加上邊緣的效應，使得電鍍不均勻的情況比不旋轉(角度 0 度)更明顯。

六、實驗五：探討加入磁場對電鍍結果的影響

因為離子在溶液中移動時會產生電流，電流又會受到磁力的影響，所以我們想要了解如果在磁場中電鍍，是不是會對電鍍表面造成影響。

我們買了兩個大磁鐵，直徑為 8.0cm，先標示出它們的 N 極與 S 極，然後設計了四個不同的磁鐵擺放方式



圖 21. 直徑 8.0 公分的磁鐵

如下圖 22 所示，並固定電流大小為 0.6A、電極距離為 9cm、電鍍時間為 30 秒、硫酸銅濃度為 0.5M，進行電鍍，最後以與實驗四相同的方法觀察電鍍的結果。

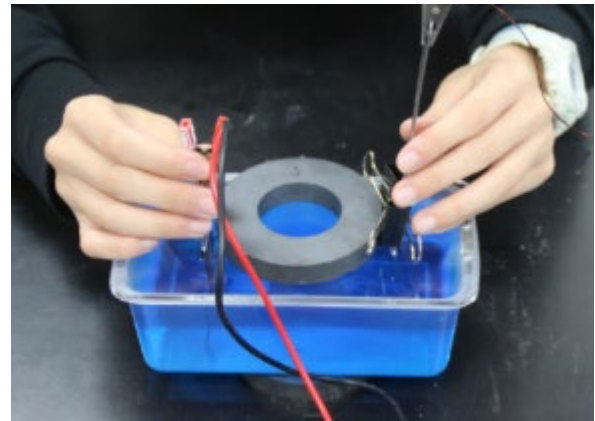
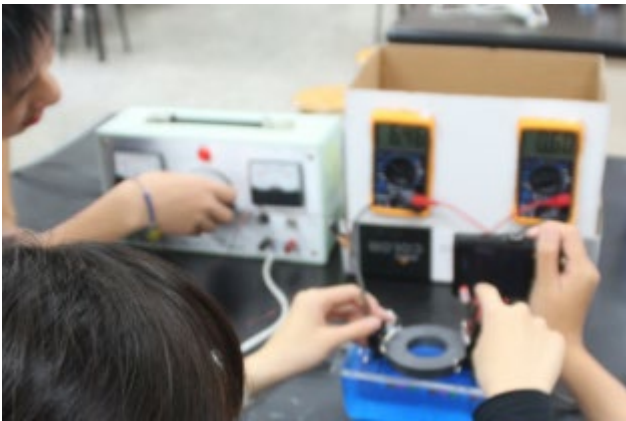
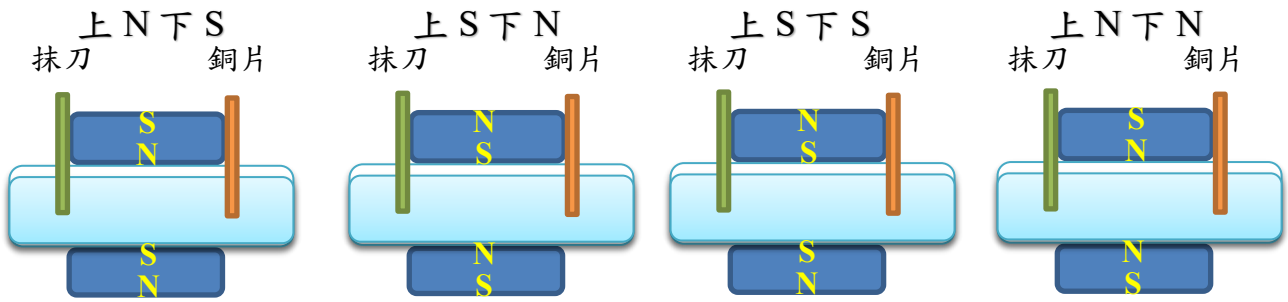


圖 22. 四種不同的磁鐵擺放方式，以造成不同的磁場方向及實際裝置圖

結果：

我們想要探討不同的磁場是否會影響電鍍的均勻程度，所以我們和實驗四相同的方法在正反面各取以下五個點進行 R/G/B 數值的讀取與電鍍完成度的計算，實驗結果照片如下圖 23，分別統計各種角度的正反面結果如下表十一到表十四並作圖如下圖 24.:



圖 23. 不同電鍍方向的電鍍結果，正面(左)與反面(右)

表十一. 上 N 下 S 時電鍍表面各點的電鍍完成度

上 N 下 S	正短邊	正短中點	正中心	正長中點	正長邊	反短邊	反短中點	反中心	反長中點	反長邊
R	148	134	136	131	132	143	147	142	149	158
G	119	110	109	103	101	115	122	120	115	139
B	99	102	108	100	92	99	125	121	133	108
R-G	29	24	27	28	31	28	25	22	34	19
R-B	49	32	28	31	40	44	22	21	16	50
加總(R-G與R-B)	78	56	55	59	71	72	47	43	50	69
電鍍完成度	45%	31%	30%	33%	40%	41%	25%	22%	27%	39%

表十二. 上 S 下 N 時電鍍表面各點的電鍍完成度

上 S 下 N	正短邊	正短中點	正中心	正長中點	正長邊	反短邊	反短中點	反中心	反長中點	反長邊
R	132	134	136	139	137	132	133	125	129	139
G	106	118	121	121	102	106	104	108	103	103
B	88	100	104	93	91	84	108	97	99	97
R-G	26	16	15	18	35	26	29	17	26	36
R-B	44	34	32	46	46	48	25	28	30	42
加總(R-G與R-B)	70	50	47	64	81	74	54	45	56	78
電鍍完成度	40%	27%	25%	36%	47%	42%	29%	24%	31%	45%

表十三. 上 S 下 S 時電鍍表面各點的電鍍完成度

上 S 下 S	正短邊	正短中點	正中心	正長中點	正長邊	反短邊	反短中點	反中心	反長中點	反長邊
R	148	143	138	142	138	146	135	133	132	140
G	117	128	127	124	110	115	102	109	107	104
B	98	102	99	106	86	100	99	103	106	101
R-G	31	15	11	18	28	31	33	24	25	36
R-B	50	41	39	36	52	46	36	30	26	39
加總(R-G與R-B)	81	56	50	54	80	77	69	54	51	75
電鍍完成度	47%	31%	27%	29%	46%	44%	39%	29%	28%	43%

表十四. 上 N 下 N 時電鍍表面各點的電鍍完成度

上 N 下 N	正短邊	正短中點	正中心	正長中點	正長邊	反短邊	反短中點	反中心	反長中點	反長邊
R	147	139	138	149	149	144	130	120	129	143
G	113	115	116	122	118	105	99	91	95	109
B	102	104	110	113	107	107	105	104	103	104
R-G	34	24	22	27	31	39	31	29	34	34
R-B	45	35	28	36	42	37	25	16	26	39
加總(R-G與R-B)	79	59	50	63	73	76	56	45	60	73
電鍍完成度	46%	33%	27%	35%	42%	44%	31%	24%	33%	42%

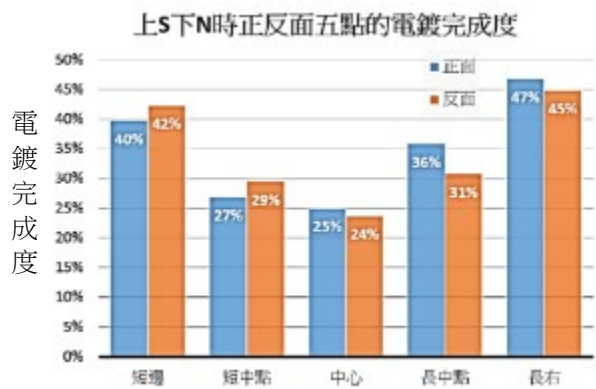
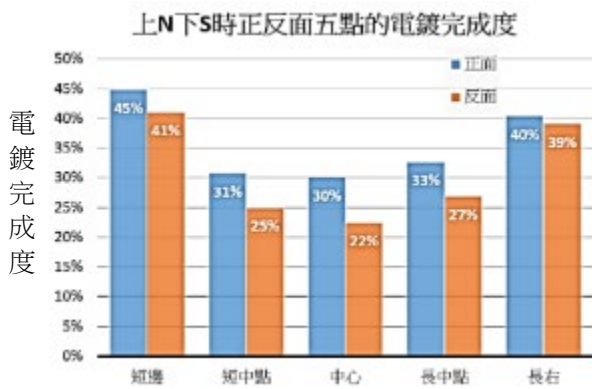


圖 24.a 上 N 下 S 時正反面各點的電鍍完成度

圖 24.b 上 S 下 N 時正反面各點的電鍍完成度

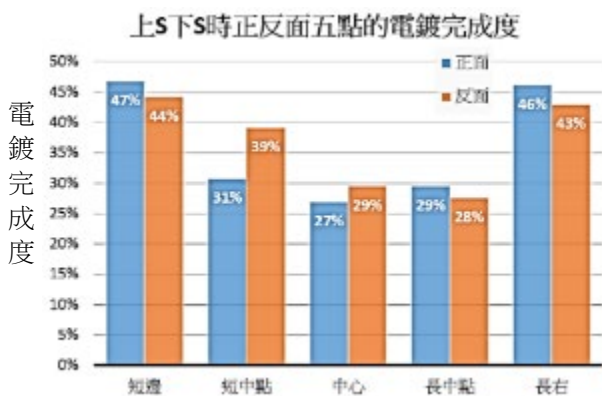


圖 24.c 上 S 下 S 時正反面各點的電鍍完成度

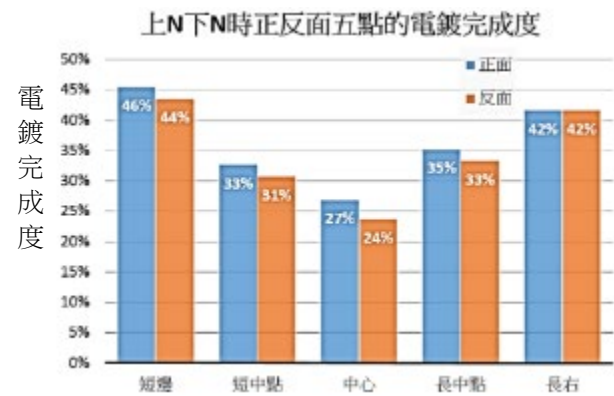


圖 24.d 上 N 下 N 時正反面各點電鍍完成度

討論：

由以上結果我們可以發現，上 N 下 S 與上 S 下 N 的電鍍結果較不均勻，邊緣厚中心薄的現象明顯。

上 S 下 S 與上 N 下 N 的電鍍表面雖然仍有邊緣厚中間薄的情況，但厚薄較均勻，且左右兩邊的電鍍厚度差異小，看不出明顯的差別。

七、實驗六：探討溶液擾動對電鍍結果的影響

我們想了解如果加上攪拌，使電鍍液處於流動的狀態是不是會使得電鍍結果較均勻或者較快，所以我們利用電磁攪拌器與攪拌子，對電鍍液進行攪拌如圖 25，並且將攪拌的速度分成不攪拌、弱攪拌與強攪拌三種，固定電極距離為 7cm、電流大小為 0.6A、硫酸銅濃度為 0.5M、電鍍時間 30 秒，進行電鍍，最後以與實驗四相同的方法觀察電鍍的結果。

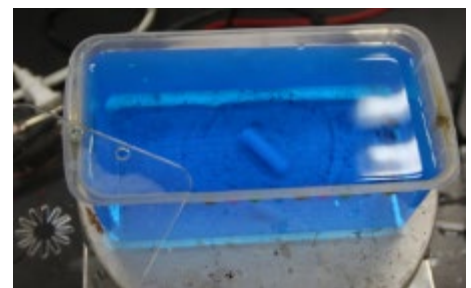


圖 25. 擾動電鍍液的實驗裝置

結果：

我們想要探討攪拌是否會影響電鍍的均勻程度，所以我們正反面各取以下五個點進行 R/G/B 數值的讀取與電鍍完成度的計算，實驗後照片如下圖 26.，取樣點的位置如下實驗四，並分別統計各種角度的正反面結果如下表十五-十七並作圖如下圖 27：

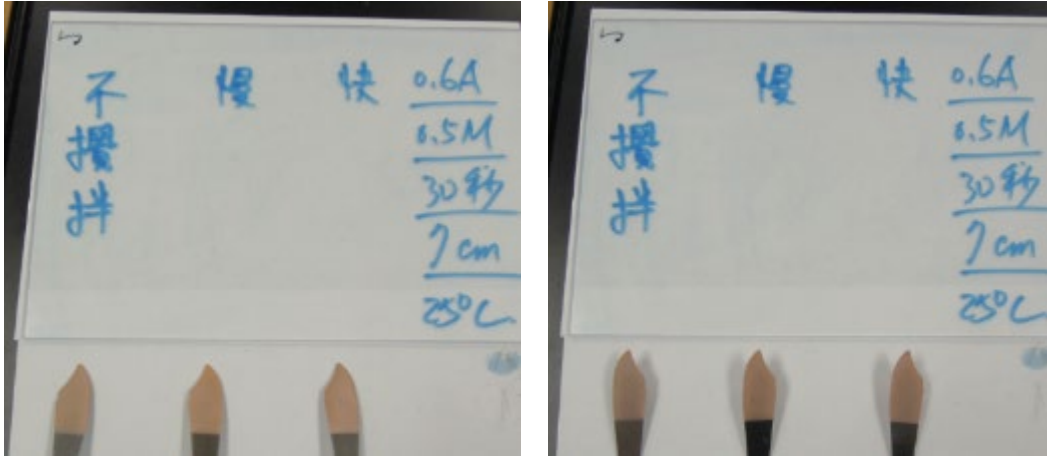


圖 26. 不同攪拌強度的電鍍結果，正面(左)與反面(右)

表十五. 不攪拌時電鍍表面各點的電鍍完成度

不攪拌	正短邊	正短中點	正中心	正長中點	正長邊	反短邊	反短中點	反中心	反長中點	反長邊
R	148	137	136	143	151	137	127	117	132	137
G	122	116	118	123	126	109	104	104	113	115
B	98	96	98	111	102	96	89	92	98	94
R-G	26	21	18	20	25	28	23	13	19	22
R-B	50	41	38	32	49	41	38	25	34	43
加總(R-G與R-B)	76	62	56	52	74	69	61	38	53	65
電鍍完成度	44%	35%	31%	28%	42%	39%	34%	19%	29%	37%

表十六. 弱攪拌時電鍍表面各點的電鍍完成度

弱攪拌	正短邊	正短中點	正中心	正長中點	正長邊	反短邊	反短中點	反中心	反長中點	反長邊
R	141	139	128	132	143	136	130	122	131	131
G	107	107	102	104	110	107	103	99	104	103
B	102	106	98	97	101	91	91	89	93	87
R-G	34	32	26	28	33	29	27	23	27	28
R-B	39	33	30	35	42	45	39	33	38	44
加總(R-G與R-B)	73	65	56	63	75	74	66	56	65	72
電鍍完成度	42%	37%	31%	35%	43%	42%	37%	31%	37%	41%

表十七. 強攪拌時電鍍表面各點的電鍍完成度

強攪拌	正短邊	正短中點	正中心	正長中點	正長邊	反短邊	反短中點	反中心	反長中點	反長邊
R	143	136	134	139	141	137	128	128	127	140
G	110	105	110	111	105	104	99	104	98	105
B	101	106	103	105	106	95	98	96	95	100
R-G	33	31	24	28	36	33	29	24	29	35

R-B	42	30	31	34	35	42	30	32	32	40
加總(R-G與R-B)	75	61	55	62	71	75	59	56	61	75
電鍍完成度	43%	34%	30%	35%	40%	43%	33%	31%	34%	43%

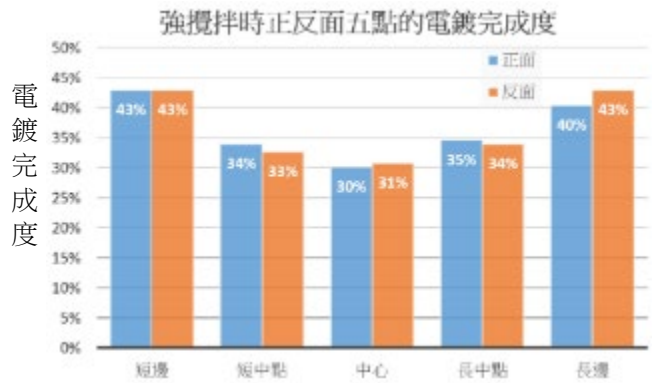


圖 27.不同攪拌程度的電鍍完成度

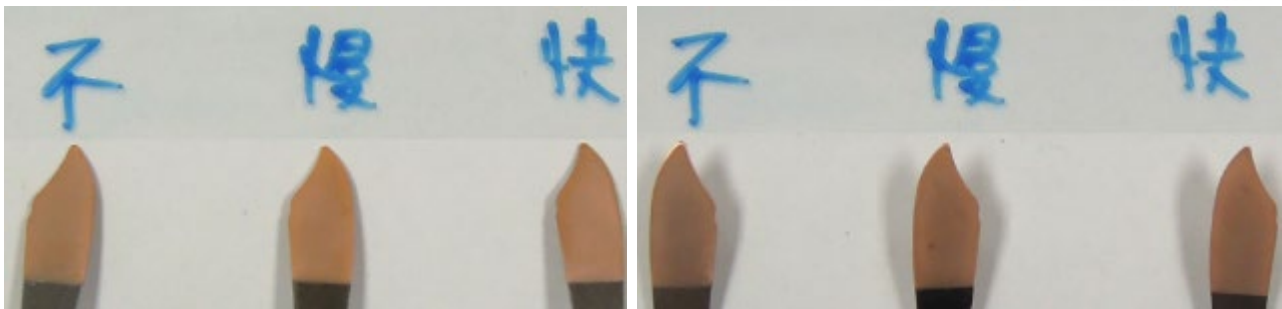


圖 28. 不同攪拌強度的電鍍結果放大圖，正面(左)與反面(右)

討論：

由以上結果我們可以發現，沒有攪拌時，邊緣與中間的電鍍完成度差異較大，也就是邊緣明顯較中央厚，但是有攪拌之後，就算是輕輕的攪拌，就可以讓邊緣與中心的電鍍完成度變得均勻許多，雖然還是邊緣高於中心但差異已經不大。

另外我們還發現，如果沒有攪拌，正面的電鍍完成度會大於反面，但是有攪拌的情況下，正面電鍍完成度不一定大於反面，兩面的電鍍完成度差不多，這是攪拌與不攪拌很大的差別。

八、實驗七：探討電解液溫度對電鍍結果的影響

溫度是影響化學反應速率的重要因素，所以我們想知道在不同的溫度下，電鍍結果是否會有不同，所以我們將硫酸銅電鍍液先倒到燒杯中，以瓦斯爐加熱，並插入溫度計測量溫度，等到 72°C 時將硫酸銅溶液倒到電鍍槽，再以溫度計測量溫度，等到約 70°C 時先以測試抹刀調整好電流大小為 0.6A，再測量溫度，記錄此溫度為初溫，然後以乾淨抹刀進行電鍍，等到電鍍完成後再以溫度計測量電鍍液溫度，記錄此時溫度為末溫。然後等電鍍液降溫到 50°C、40°C 與 25°C 時分別再進行相同步驟的實驗。

我們以 0.5M 硫酸銅溶液進行電鍍，固定距離為 7cm、電鍍角度為 0 度、電流大小 0.6A 以及電鍍時間 30 秒，一樣電鍍完成後以蒸餾水沖洗，吹風機吹乾，進行拍照及電鍍完成度分析，結果如下表 15-18 並作圖，並記錄不同溫度下維持電流 0.6A 所需的電壓。



圖 29.電鍍液加熱後進行電鍍 圖 30.進行電鍍實驗

結果：

實驗結果如下圖，我們發現 70°C 時電鍍層很薄，比 25°C 薄很多如下圖 31。讀出該電鍍正反面五點的 R/G/B 值進行記錄與分析，在實驗過程中，我們也記錄不同溫度時需要維持 0.6A 的電壓，觀察電壓的變化，紀錄如下表十八-二十二。

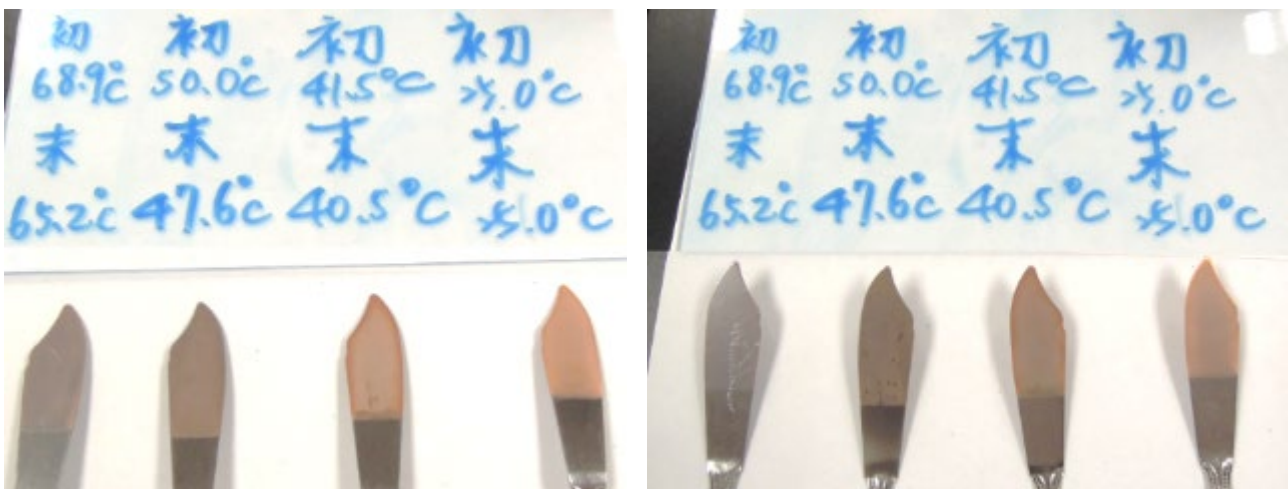


圖 31:不同溫度下的電鍍結果

表十八. 70°C 時電鍍表面各點的電鍍完成度

70°C	正短邊	正短中點	正中心	正長中點	正長邊	反短邊	反短中點	反中心	反長中點	反長邊
R	135	136	133	134	135	136	134	136	142	139
G	131	132	131	126	133	131	128	131	132	132
B	117	119	117	122	115	120	124	124	131	128
R-G	4	4	2	8	2	5	6	5	10	7
R-B	18	17	16	12	20	16	10	12	11	11
加總(R-G與R-B)	22	21	18	20	22	21	16	17	21	18
電鍍完成度	9%	8%	6%	8%	9%	8%	5%	6%	8%	6%

表十九. 50°C 時電鍍表面各點的電鍍完成度

50°C	正短邊	正短中點	正中心	正長中點	正長邊	反短邊	反短中點	反中心	反長中點	反長邊
R	139	141	145	145	135	139	139	139	136	144
G	125	127	131	127	120	126	124	128	128	126
B	113	114	122	116	111	110	110	114	109	128
R-G	14	14	14	17	15	13	15	11	9	18
R-B	26	27	23	28	24	30	29	25	28	16
加總(R-G與R-B)	40.2	41.3	36.9	45.7	39.1	42.6	44.4	36.6	36.2	34
電鍍完成度	21%	21%	19%	24%	20%	22%	23%	18%	18%	17%

表二十. 40°C 時電鍍表面各點的電鍍完成度

40°C	正短邊	正短中點	正中心	正長中點	正長邊	反短邊	反短中點	反中心	反長中點	反長邊
R	134	136	142	136	135	136	136	136	135	141
G	116	116	128	117	104	114	116	114	115	117
B	100	108	113	109	109	104	110	115	116	110
R-G	18	20	14	19	31	22	20	22	20	24
R-B	34	28	29	27	26	32	26	21	19	31
加總(R-G與R-B)	52	48	43	46	57	54	46	43	39	55
電鍍完成度	28%	26%	22%	24%	31%	29%	24%	22%	20%	30%

表二十一. 25°C 時電鍍表面各點的電鍍完成度

25°C	正短邊	正短中點	正中心	正長中點	正長邊	反短邊	反短中點	反中心	反長中點	反長邊
R	148	137	136	143	151	137	127	117	132	137
G	122	116	118	123	126	109	104	104	113	115
B	98	96	98	111	102	96	89	92	98	94
R-G	26	21	18	20	25	28	23	13	19	22
R-B	50	41	38	32	49	41	38	25	34	43
加總(R-G與R-B)	76	62	56	52	74	69	61	38	53	65
電鍍完成度	44%	35%	31%	28%	42%	39%	34%	19%	29%	37%

表二十二. 不同溫度下維持 0.6A 所需要的電壓

溫度(°C)	25	40	50	70
電壓(V)	5.07	3.82	3.46	3.07

溫度與電壓的關係

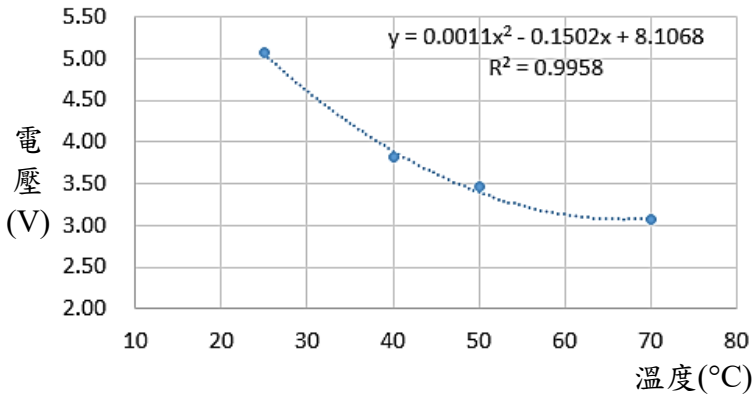


圖 32.不同溫度下維持 0.6A 所需要的電壓



圖 33a.70°C 時的正反面各點的電鍍完成度圖

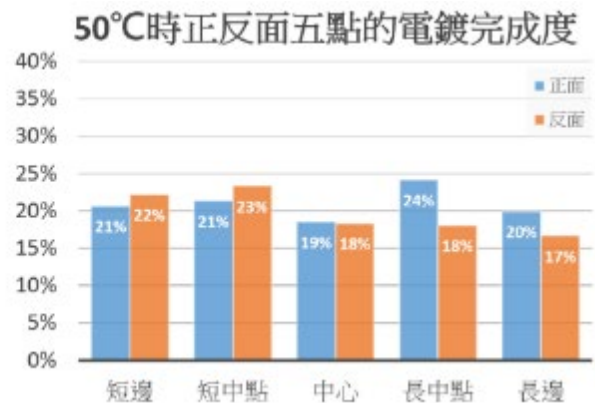


圖 33b.50°C 時的正反面各點的電鍍完成度

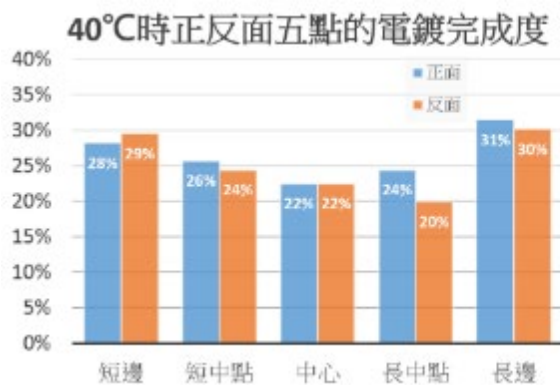


圖 33c.40°C 時的正反面各點的電鍍完成度圖



圖 33d.25°C 時的正反面各點的電鍍完成度

討論：

由以上結果我們發現溫度越高時，電鍍的完成度越低，用眼睛觀察也明顯可以看出電鍍厚度明顯變薄，尤其是 70°C 時，銅的紅色很淡，背面幾乎只有一點點紅色，看起來就是底材不鏽鋼的顏色。

而且我們觀察到在 70°C 時正反面的電鍍完成度差異較小，邊緣與中心的厚度均勻，沒有明顯差別。接近室溫 25°C 時，邊緣與中心的電鍍完成度差異明顯邊緣大於中間。

九、實驗八：探討電鍍時發生的黑色物質

我們想要進一步探討鍍銅表面變黑到底是甚麼物質，因為溶液中只有硫酸銅與蒸餾水，所以我們假設鍍銅表面變黑，黑色的物質可能是金屬銅或是氧化銅(黑色)，在國二下酸鹼鹽的課程中我們知道，如果是金屬銅，應該不會溶解於鹽酸中，但是可以溶解在硝酸中，而如果他是氧化銅，應該會溶解於鹽酸中。所以設計以下的實驗：

- 1.將銅片洗淨，再以酒精燈加熱，使銅片表面產生黑色氧化銅
- 2.在黑色氧化銅表面滴上濃鹽酸，觀察氧化銅溶解是否溶解
- 3.利用 0.05M CuSO_4 溶液與 1.2A 電流電鍍抹刀，產生黑色電鍍表面
- 4.在黑色電鍍表面滴上濃鹽酸，觀察黑色物質溶解是否溶解
- 5.在黑色電鍍表面滴上濃硝酸，觀察黑色物質溶解是否溶解



圖 34.酒精燈加熱銅片產生黑色氧化銅

結果：

- 1.酒精燈加熱後的銅片表面生成黑色氧化銅，滴濃硫酸後，可以發現幾乎完全溶解如下圖
- 2.銅片表面滴上濃硝酸，產生紅棕色氣體，有溶解現象
- 3.抹刀表面先鍍上黑色的物質，滴上濃鹽酸後，顏色略有變淡，但沒有明顯溶解
- 4.抹刀表面黑色的物質，滴上濃硝酸後，立刻完全溶解



圖 35.氧化銅溶於濃鹽酸，電鍍黑色物質不溶於濃鹽酸，易溶於濃硝酸

討論：

由以上的實驗結果，我們認為黑色的電鍍物應該是金屬銅，但是可能因為結構鬆散，孔隙多而吸收了光線使表面看起來是黑色的。

由此結果，可以解釋為何硫酸銅低濃度時，較大的電流就會造成表面變黑，可能是因為濃度低而電流大時，溶液中電極附近銅離子較少，來不及到電極上接收電子，使負極附近的水分子被電解，影響了銅離子的附著，產生了鬆散的結構而變黑。

但是以上實驗只是證明黑色物質不是氧化銅，但是否可能是銅的其他化合物呢？我們將電鍍完的黑色表面的抹刀裁剪至適當大小，進行 X-射線光電子光譜分析(XPS)，看黑色電鍍表面的原子組成是否為金屬銅。總共進行了兩片，分析結果如下圖：



圖 36.兩片黑色電鍍表面樣本

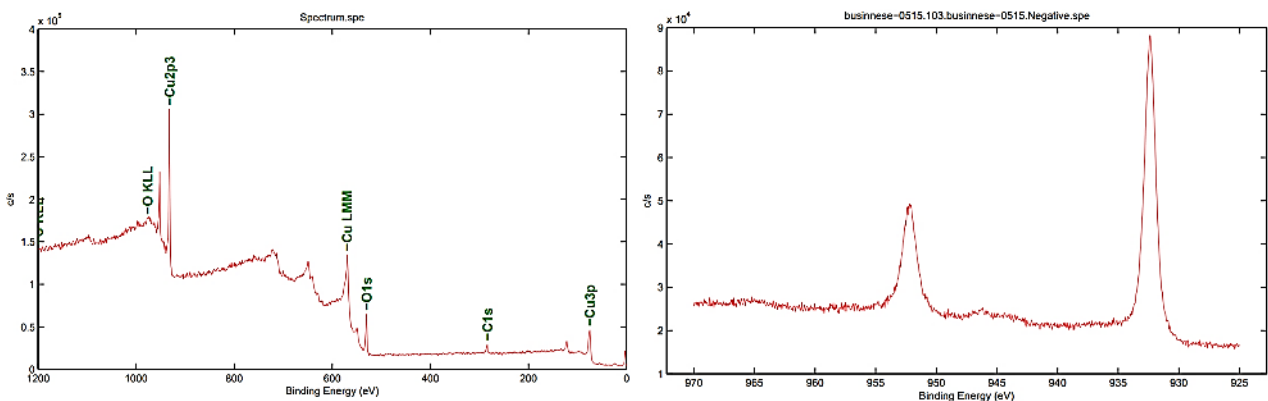


圖 37、黑色電鍍表面的 XPS 全譜圖與銅的圖譜

上圖與我們查到的銅 XPS 圖形(如下圖)一致，並與其他可能的銅化合物不一樣，因此可以確定黑色的物質主要就是金屬銅。

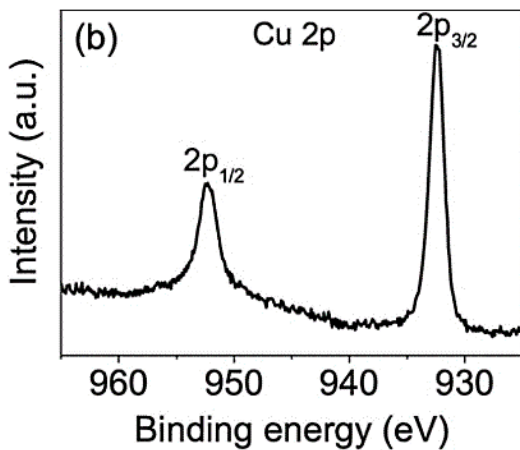


圖 38.1 取自 researchgate 機構
https://www.researchgate.net/figure/a-The-XPS-survey-spectrum-b-the-XPS-spectrum-of-Cu-2p-c-the-XPS-spectrum-of-S-2p_fig9_230954292

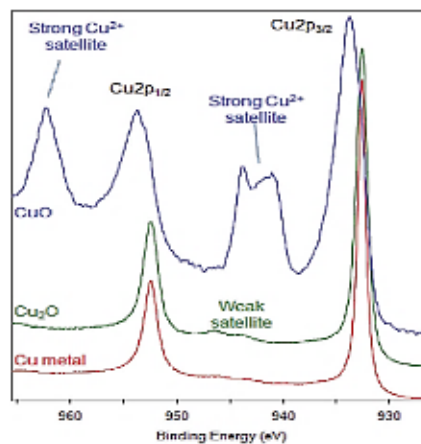


圖 38.2 取自 <https://xpssimplified.com/elements/copper.php>

綜合以上鹽酸與硝酸的實驗及 XPS 的結果，我們相信低硫酸銅濃度與大電流電鍍產生的黑色物質為金屬銅。

伍、結論

根據我們以上的實驗，可以得到以下的結論

- 一、由實驗一可知，電鍍的電流太大時，被電鍍物表面會變黑，但如果小於某一電流，電鍍表面就不會變黑，而在實驗三濃度變因的這個實驗中我們發現這個不使電鍍表面變黑電流的大小會隨著濃度而改變。
- 二、由實驗二可知，即使我們固定電量(電流與時間的乘積)，電鍍完成度仍會隨著電及間的距離改變，被鍍物離正極銅片距離越遠，電鍍完成度越低，電鍍的厚度較薄。
- 三、由實驗三可知，相同的電鍍電流與時間下，濃度越低，電鍍的完成度越高，也就是說相同的電流時，反而濃度低的電鍍液反而會使電鍍厚度較厚。但濃度越低，不使電鍍表面變黑電流的大小會愈小，相對會使所需的電鍍時間變長。
- 四、由實驗四可知，被鍍物的邊緣曲率半徑小，電鍍層會比中心厚，當被鍍物旋轉角度越大時，靠近銅片的一端電鍍完成度會大於遠離銅片的那一端，再加上邊緣的效應，使得電鍍不均勻的情況比不旋轉(角度 0 度)更明顯。
- 五、由實驗五可知，磁場會影響電鍍的均勻度，銅離子在固定方向磁場中移動時，除了向負極移動，也會移向電流所受磁力的方向，而造成被鍍物厚鍍不均勻。如果是在上 S 下 S 或上 N 下 N 的相斥磁場中，電鍍表面厚薄較均勻，電鍍厚度差異小。
- 六、由實驗六可知，沒有攪拌時，邊緣明顯較中央厚，但是有攪拌之後，就算是輕輕的攪拌，就可以讓邊緣與中心的厚度變得均勻許多，且使正反面的電鍍厚度接近。
- 七、由實驗七可知，電鍍液的溫度越高時，電鍍厚度明顯變薄，而且正反面電鍍完成度差異變大，但同一面的電鍍完成度差異變小，邊緣與中心的厚度均勻，沒已有明顯差別。
- 八、由實驗八可知，電鍍產生的黑色物質應該是結構鬆散的金屬銅。

總結以上的實驗結果，要避免產生黑色電鍍表面並電鍍均勻，必須提高硫酸銅濃度，避免太大的電流，並攪拌溶液。

陸、參考文獻

- 一. 郭重吉等編著(民國 108 年)，自然與生活科技三下 1-5 電流的化學效應，南一出版。
- 二. 郭重吉等編著(民國 108 年)，自然與生活科技三下 2-3 電流與磁場的交互作用，南一出版。
- 三. 楊傑超等、民國 93 年，金屬的盔甲，中華民國第 44 屆全國科展。
- 四. 莊禮禎等、民國 103 年，變形金「筆」～粉筆變身為環保電鍍裝置，中華民國第 57 屆全國科展。
- 五. Aiwei Tang, Shengchun Qu, Kai Li, Yanbing Hou, Feng Teng, Jie Cao, Yongsheng Wang and Zhanguo Wang, 2010, One-pot synthesis and self-assembly of colloidal copper(I) sulfide nanocrystals, Nanotechnology
- 六. <https://xpssimplified.com/elements/copper.php>, 2020/6, Thermo Fisher Scientific Inc

【評語】 030207

1. 電鍍是很有趣的實驗，本實驗數據豐富，可見有認真執行。
2. 國中生的科展除了注重創新外，也期望能有邏輯推理，但是不需要使用到像 XRD 或 XPS 等分析儀器，尤其是又無法清楚判斷實驗數據。
3. 本實驗改變許多變因，但未見討論為何要規劃這些變因，以及這些變因對最後的結果有何影響。
4. 期待同學以後可加強實驗結果的判讀，提出假設，再進一步改變實驗條件。

摘要

在這個研究中，我們探討了不同的變因對電鍍完成度以及均勻度的影響，並探討了電鍍時產生黑色物質。我們發現電鍍產生的黑色物質應該是結構鬆散的金屬銅，而要避免產生黑色電鍍表面並電鍍均勻，必須提高硫酸銅濃度，避免太大的電流，並攪拌溶液。

壹、研究動機

在一次電鍍硫酸銅實驗課程中，我們發現鍍上的銅很不均勻，且有些被覆蓋上黑色物質。與預期結果是均勻紅銅覆蓋在被鍍物上不相同，覺得很好奇，於是我們決定著手進行研究。

貳、研究目的

- 一. 探討不同電流大小對電鍍結果的影響
- 二. 探討電極距離對電鍍結果的影響
- 三. 探討不同濃度的硫酸銅水溶液對電鍍結果的影響
- 四. 探討被鍍物方向對電鍍結果的影響
- 五. 探討加入磁場對電鍍結果的影響
- 六. 探討溶液擾動對電鍍結果的影響
- 七. 探討電解液溫度對電鍍結果的影響
- 八. 探討電鍍時發生的黑色物質

參、研究設備及器材

其它詳見作品說明書

肆、實驗方法、結果與討論

實驗準備

一、組裝電鍍槽

利用壓克力板雷切製作不同功能蓋板，將它鎖在塑膠槽中作為電鍍槽。



二、組裝電鍍裝置

參考課本電鍍裝置設計電鍍電路圖如下，並利用兩個三用電表分別測量電鍍時的電壓與電流。



三、配製硫酸銅溶液

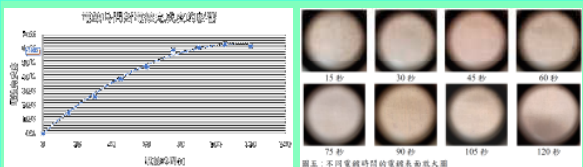
蒸餾水和硫酸銅配置所需濃度的硫酸銅水溶液



四、電鍍完成度

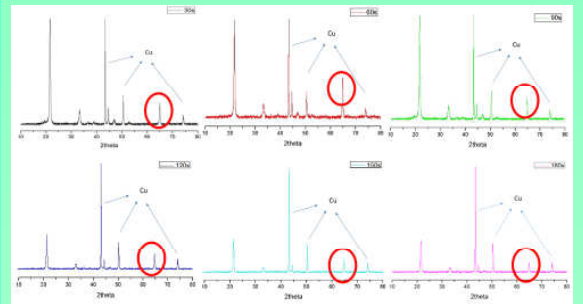
以固定電流與硫酸銅濃度對抹刀進行電鍍，每隔一段時間取出，以蒸餾水沖洗後再用吹風機吹乾拍照，用PhotoImpact軟體的色彩選擇工具選擇抹刀上固定的點，讀取R/G/B值，用R-G值與R-B值的加總值當作參考，以未電鍍的抹刀作為電鍍完成度0%的點，以純銅片作為電鍍完成度100%的點，判斷不同電鍍條件下的電鍍結果照片。

試片										
電鍍時間	0秒	15秒	30秒	45秒	60秒	75秒	90秒	105秒	120秒	
電鍍完成度	0%	15%	26%	39%	47%	59%	61%	64%	62%	100%



圖五：不同電鍍時間的鍍膜表面XRD

為了瞭解相同條件但不同電鍍時間度出來的銅膜結晶狀態好不好，所以我們另外進行了30秒、60秒、90秒、120秒、150秒、180的鍍銅，再將抹刀裁剪成1平方公分大小的樣品，進行X-射線繞射分析(XRD)，結果如下圖。



圖六：不同電鍍時間的XRD結果

可以發現，電鍍時間較短時，測量到其他雜質的相對訊號較強，當電鍍時間較長時，其他雜質的相對訊號較弱，代表較好的銅覆蓋率及較厚的銅。因此我們接下來就利用該電鍍表面的R/G/B值進行分析比較不同條件下的電鍍完成度。

實驗一：探討不同電流對電鍍結果的影響

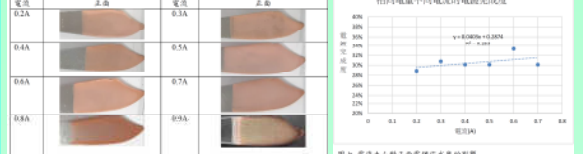
固定銅片與被鍍物(抹刀)的距離、硫酸銅濃度、電量為18庫侖，進行電鍍。電流與時間如下表，電鍍完成後以蒸餾水沖洗抹刀並拍照。

結果：

表一、固定電量時的電流與時間

電流(安培、A)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
時間(秒、s)	90	60	45	36	30	26	23	20
電量(庫侖、C)	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.2	18.4	18.0

表二、不同電流的電流下，電鍍的抹刀照片



討論：

由以上結果知道，在固定電量不變的情況下，電流大小對電鍍完成度影響不大。在我們的實驗條件下，當電流為0.9A時，在抹刀邊緣的電鍍表面容易出現變黑，但是當電流小於0.7A時，不管是抹刀邊緣還是中心，電鍍表面都不會變黑。

實驗二：探討電極距離對電鍍結果的影響

固定硫酸銅的濃度、電流大小、電鍍時間，分別以電極距離3、5、7、9、11公分進行電鍍。



結果：



表三：不同電極距離下，電鍍的電鍍完成度與電量

距離(cm)	3	5	7	9	11
電鍍完成度	39%	46%	28%	24%	24%
0.6A 固定電量(C)	3.40	4.52	5.07	6.56	8.91

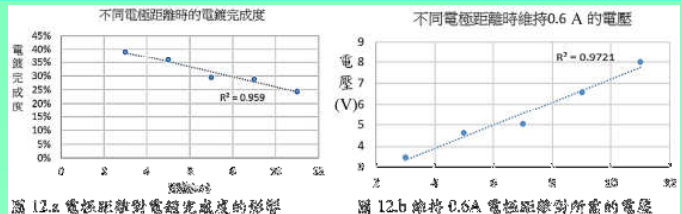


圖 12.a 電極距離對電鍍完成度的影響 圖 12.b 維持 0.6A 電流磁場對所需的電壓

討論：
 由實驗結果可以發現電鍍的完成度還是會隨著距離的增加而降低，電極距離3公分時電鍍完成度約39%，但距離11公分時的電鍍完成度大約只有24%，大約下降了40%。而我們也觀察到電極距離越遠，維持0.6A所需要的電壓越大。因為電流大小與電鍍時間不變，根據電量=電流x時間，電量應該不變。而且電鍍銅在負極的反應式為 $Cu^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Cu$ ，如果電量相同，產生金屬銅的質量應該也要相同，但實驗結果不是這樣，讓我們覺得疑惑。

實驗三：探討不同濃度的硫酸銅水溶液的影響

配製1.0M、0.5M、0.1M與0.05M的硫酸銅溶液，固定電流大小、電極距離、電鍍時間進行實驗。



圖 15. 不同電鍍液濃度正面(左)與反面(右)放大圖

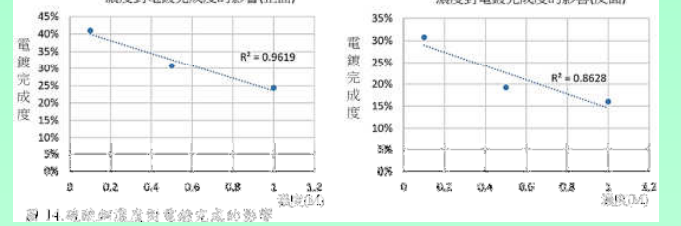


圖 14. 硫酸銅濃度對電鍍完成度的影響

討論：
 由以上的結果我們發現，濃度低時，容易出現電鍍表面變黑，在濃度0.5M時，電流可以到0.7A還不會使電鍍表面變黑，但是當濃度是0.05M時，只要電流達到0.1A，電鍍表面就會變黑了。

固定電流大小為0.1A，時間為180秒，電量相同，濃度越低電鍍的完成度越高，也就是說相同的電流時，反而濃度低的電鍍液較有利於電鍍。但是濃度低時無法調高電流，因為會使高電流會使電鍍表面變黑，所以如果是固定電量，還是應該以較高的濃度來進行電鍍，以節省電鍍的時間。而且我們可以由上圖15觀察到在這樣的實驗條件下，高濃度的1.0M正面與背面電鍍完成度有明顯的差異，眼睛就可以觀察的出來，而低濃度0.1M的電鍍，正背面的差異不明顯。

實驗四：探討被鍍物方向對電鍍結果的影響

固定電流大小、電極距離、硫酸銅濃度、電鍍時間，來進行不同角度的實驗，並取樣不同位置觀察電鍍結果

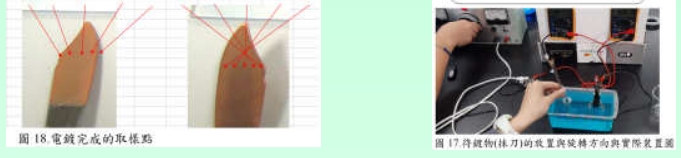


圖 17. 待鍍物(抹刀)的放置與旋轉方向與實際裝置圖 圖 18. 電鍍完成的取樣點

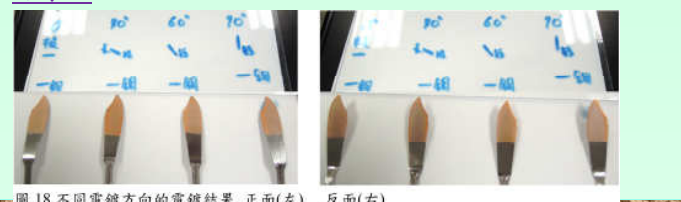


圖 18. 不同電鍍方向的電鍍結果, 正面(左) 反面(右)



圖 20.a: 0 度時正反面各點的電鍍完成度 圖 20.b: 30 度時正面各點的電鍍完成度

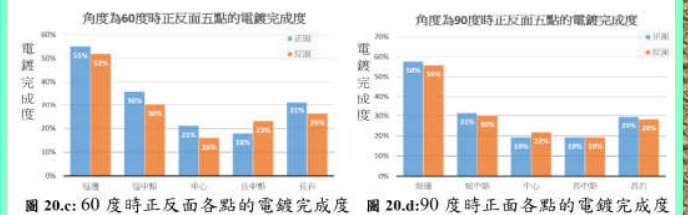


圖 20.c: 60 度時正反面各點的電鍍完成度 圖 20.d: 90 度時正面各點的電鍍完成度

討論：
 抹刀邊緣的電鍍完成度大於中心處，我們實際觀察電鍍後銅片也是相同的結果。也驗證了我們之前的懷疑，因為抹刀邊緣曲率半徑較小，負電荷密度高，所以電鍍的完成度較高，鍍上去的銅厚度較厚。當被鍍物(抹刀)旋轉角度越大時，靠近銅片的一端電鍍完成度會大於遠離銅片的那一端，再加上邊緣的效應，使得電鍍不均勻的情況比不旋轉(角度0度)更明顯。

實驗五：探討加入磁場對電鍍結果的影響

固定電流大小、電極距離、電鍍時間、硫酸銅濃度，以下列四種磁鐵擺放方式進行電鍍，清洗及拍照分析。

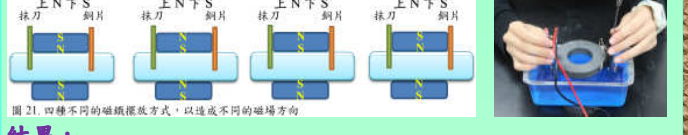


圖 21. 四種不同的磁鐵擺放方式，以造成不同的磁場方向 圖 22. 磁鐵擺放方式的實驗裝置



圖 23. 不同電鍍方向的電鍍結果, 正面(左)與反面(右)

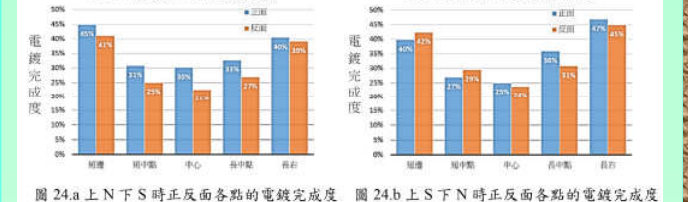


圖 24.a 上 N 下 S 時正反面各點的電鍍完成度 圖 24.b 上 S 下 N 時正反面各點的電鍍完成度



圖 24.c 上 S 下 S 時正反面各點的電鍍完成度 圖 24.d 上 N 下 N 時正反面各點電鍍完成度

討論：
 由以上結果我們可以發現，上NFS與上S下N的電鍍結果較不均勻，邊緣厚中間薄的現象明顯。上S下S與上N下N的電鍍表面雖然仍有邊緣厚中間薄的情況，但厚薄較均勻，且左右兩邊的電鍍厚度差異小，看不出明顯的差別。

實驗六：探討溶液攪動對電鍍結果的影響

利用電磁攪拌器與攪拌子，對電鍍液進行攪拌如圖25，並且將攪拌的速度分成不攪拌、弱攪拌與強攪拌三種，固定電極距離為7cm、電流大小為0.6A、硫酸銅濃度為0.5M、電鍍時間30秒，進行電鍍。

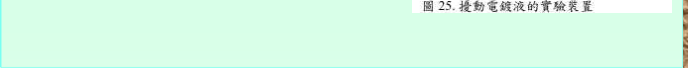


圖 25. 攪動電鍍液的實驗裝置

結果與討論：



圖 28. 不同攪拌強度的電鍍結果放大圖，正面(左)反面(右)

沒有攪拌時，邊緣與中間的電鍍完成度差異較大，攪拌可以讓邊緣與中心的電鍍完成度變得均勻許多

實驗七：探討電解液溫度對電鍍結果的影響

將硫酸銅電鍍液先倒到燒杯中，以瓦斯爐加熱，並插入溫度計測量溫度，等到72°C時將硫酸銅溶液倒到電鍍槽，再以溫度計測量溫度，等到約70°C以乾淨抹刀進行電鍍，等到電鍍完成後再以溫度計測量電鍍液溫度，記錄此時溫度為末溫。然後等電鍍液降溫到50°C、40°C與25°C時分別再進行相同步驟的實驗。

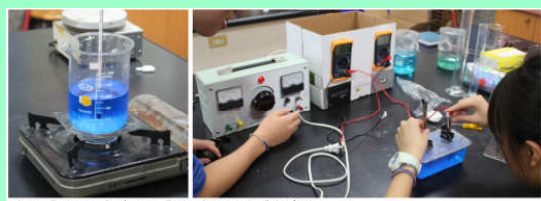
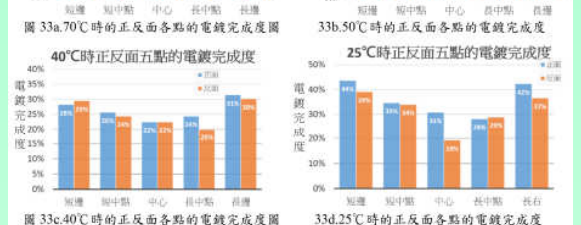


圖 29. 電鍍液加熱後進行電鍍 圖 30. 進行電鍍實驗

結果：



討論：

我們發現溫度越高時，電鍍的完成度越低，電鍍厚度明顯變薄，而且在70°C時正反面的電鍍完成度差異較小，邊緣與中心的厚度均勻。這個實驗結果也另我們困惑，在較高溫度時，相同的電量，產生的金屬銅較低溫時少很多。我們猜測或許是高溫時水也被電解。高溫時要維持0.6A所需電壓較低，也就是如果電壓相同，高溫時電流較大。

實驗八：探討電鍍時發生的黑色物質

鍍銅表面變黑到底是甚麼物質？因為溶液中只有硫酸銅與蒸餾水，所以我們假設鍍銅表面的黑色的物質可能是金屬銅或是氧化銅(黑色)，在國二下酸鹼鹽的課程中我們學到，如果是金屬銅，應該不會溶解於鹽酸中，但是可以溶解在硝酸中，而如果是氧化銅，會溶解於鹽酸中。所以設計以下的實驗：

1. 將銅片洗淨，再以酒精燈加熱，使銅片表面產生黑色氧化銅
2. 在黑色氧化銅表面滴上濃鹽酸，觀察氧化銅溶解是否溶解
3. 利用0.05M 硫酸銅溶液與1.2A 電流電鍍抹刀，產生黑色電鍍物
4. 在黑色電鍍表面滴上濃鹽酸，觀察黑色物質溶解是否溶解
5. 在黑色電鍍表面滴上濃硝酸，觀察黑色物質溶解是否溶解



結果：



圖 35. 氧化銅溶於濃鹽酸，電鍍黑色物質不溶於濃鹽酸，易溶於濃硝酸

1. 酒精燈加熱後的銅片表面生成黑色氧化銅，滴濃鹽酸後，幾乎完全溶解如圖
2. 抹刀表面先鍍上黑色的物質，滴上濃鹽酸後，顏色略有變淡，但沒有明顯溶解
3. 抹刀表面黑色的物質，滴上濃硝酸後，立刻完全溶解

以上實驗只是證明黑色物質不是氧化銅，但是否可能是銅的其他化合物呢？我們將電鍍完的黑色表面的抹刀裁剪至適當大小，進行X-射線光電子光譜分析(XPS)，看黑色電鍍表面的原子組成是否為金屬銅。總共進行了兩片，分析結果如下圖：



圖 36. 兩片黑色電鍍表面樣本

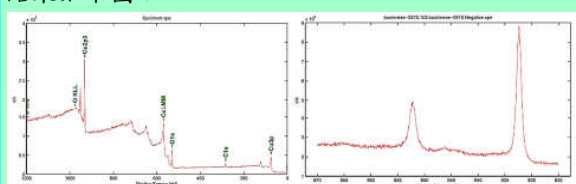
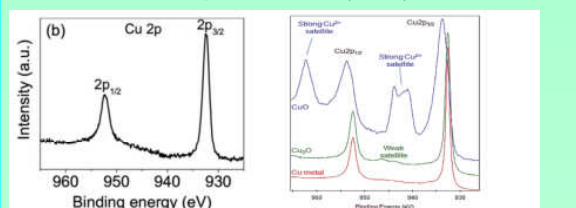


圖 37. 黑色電鍍表面的 XPS 全球圖與銅的圖譜

與我們查到的金屬銅XPS圖形(如下)相同



取自 researchgate 機構 https://www.researchgate.net/figure/a-The-XPS-survey-spectrum-b-the-XPS-spectrum-of-Cu-2p-c-the-XPS-spectrum-of-S-2p_fig_2309584292

討論：

綜合以上鹽酸與硝酸的實驗及XPS的結果，我們相信低硫酸銅濃度與大電流電鍍產生的黑色物質為金屬銅。

伍、結論

綜合以上的實驗，我們得到幾個結論：

1. 電鍍的**電流太大時**，被電鍍物表面會變黑，而我們發現這個不使電鍍表面變黑電流的大小會隨著濃度變小而變小。
2. 固定電量，電鍍完成度仍會隨著電極間的距離改變，**被鍍物離正極銅片距離越遠，電鍍完成度越低**，電鍍的厚度較薄。
3. 相同的電鍍電流與時間下，**濃度越低，電鍍的完成度越高**。但濃度越低，不使電鍍表面變黑電流的大小會愈小，所需的電鍍時間變長。
4. 電鍍時，靠近銅片的一端電鍍完成度會大於遠離銅片的那一端。
5. 磁場會影響電鍍的均勻度，在固定方向磁場中被鍍物鍍膜厚度不均勻。如果是在上S下S或上N下N的相斥磁場中，電鍍表面厚薄較均勻，電鍍厚度差異小。
6. 沒有攪拌時，邊緣明顯較中央厚，但是**有攪拌之後**，**邊緣與中心的厚度變得均勻許多**，且使正反面的電鍍厚度相近。
7. 電鍍液的**溫度越高時**，**電鍍完成度明顯下降**，同一面的電鍍完成度邊緣與中心的厚度均勻。
8. 大電流電鍍硫酸銅溶液產生的**黑色物質應該是結構鬆散的金屬銅**。
9. 要避免產生黑色電鍍表面並電鍍均勻，必須提高硫酸銅濃度，避免太大的電流，並攪拌溶液。